



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**MODELOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN
PARA MAMPOSTERÍA FABRICADA EN
MÉXICO D.F.**

T E S I S

Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Presenta:

ADÁN FLORES CANO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DANNY ARROYO ESPINOZA

MÉXICO, D.F.

FEBRERO DE 2010

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ingeniería Estructural de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, por todo su apoyo y tiempo dedicado en impartir los conocimientos que forman parte de mi persona.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Danny Arroyo Espinoza, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto bajo su asesoría, por todo su apoyo y confianza.

Al Técnico Académico Leopoldo Quiroz Soto (*que en paz descanse*), por ser nuestro guía en el laboratorio y estar siempre pendiente en la realización de todos los trabajos experimentales concernientes al Posgrado.

Al Dr. Arturo Tena Colunga y al M. en I. Raúl Jean Perrilliat, por ser parte del jurado de mi examen de grado y por dedicar su tiempo en la revisión de esta tesis.

A todos mis compañeros de maestría y doctorado, por su amistad y por esos momentos de apoyo.

Y desde luego, a todo el personal que labora dentro y fuera de las instalaciones del Laboratorio de Estructuras de la UAM Azcapotzalco, a los alumnos de la licenciatura en Ingeniería Civil que participaron en este proyecto, a todos ustedes gracias por su apoyo en todo momento y hacer que las jornadas de trabajo fueran muy agradables.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2	
ANTECEDENTES	4
2.1 ESTUDIOS PREVIOS.....	4
2.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CURVA ESFUERZO- DEFORMACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA	5
2.3 MECANISMO DE FALLA DE LA MAMPOSTERÍA SUJETA A COMPRESIÓN AXIAL	6
2.3.1 Consideraciones.....	6
2.3.2 Modos de falla.....	7
2.3.3 Modelo teórico de Hilsdorf, para predecir la resistencia a compresión de la mampostería.....	8
2.3.4 Factores que influyen en la resistencia a compresión de la mampostería.....	12
2.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO D.F. Y EN NUEVA ZELANDA.....	16
2.4.1 Meli y Reyes (1971)	16
2.4.2 Meli y Hernández (1971)	20
2.4.3 Priestley y Elder (1982).....	29
2.4.3.1 Curvas esfuerzo-deformación para los especímenes de la serie 1	32
2.4.3.2 Curvas esfuerzo-deformación para los especímenes de la serie 2	34
CAPÍTULO 3	
PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	37
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MURETES DE MAMPOSTERÍA	37
3.2.1 Características de los muretes de mampostería a ensayar	37
3.2.2 Proceso de construcción.....	39
3.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MURETES	41
3.3.1 Piezas de mampostería.....	41
3.3.2 Peso Volumétrico.....	42

3.3.3 Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua, según NMX-C-037-ONNCCE (2005)	43
3.3.4 Resistencia a la compresión, según NMX-C-036-ONNCCE (2004) y resistencia de diseño a la compresión, según NTCM-2004 del RCDF	45
3.3.5 Mortero Tipo I.....	46
3.3.5.1 Granulometría de la arena	46
3.3.6 Resistencia a la compresión, según NMX-C-061 y resistencia de diseño a la compresión, según NTCM-2004 del RCDF	47
3.3.7 Resumen de las propiedades obtenidas y comparación numérica respecto a lo que permiten las normas en cuestión	49
3.4 INSTRUMENTACIÓN Y DISPOSITIVO DE CARGA	50
3.4.1 Dispositivo de carga	50
3.4.2 Instrumentación	50
3.4.3 Sistema de adquisición de datos.....	52
3.4.4 Máquina universal de ensayos.....	52
3.5 OBTENCIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA	53
3.5.1 Obtención de la curva experimentalmente	53
3.5.2 Obtención de la curva mediante una corrección analítica	55
3.5.2.1 Corrección analítica de la rama ascendente hasta el esfuerzo máximo	55
3.5.2.2 Corrección analítica de la rama descendente después del esfuerzo máximo	58
 CAPÍTULO 4	
RESULTADOS EXPERIMENTALES	60
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
4.1.1 Resistencia de las mamposterías	60
4.1.2 Módulo de Elasticidad	62
4.1.3 Deformación asociada al esfuerzo máximo	63
4.1.4 Velocidad de carga	63
4.1.5 Curva esfuerzo-deformación.....	63
4.4.5.1 Rama ascendente	63
4.4.5.2 Rama descendente	64
4.1.6 Resumen de los resultados obtenidos	71
 4.2 MODELOS PROPUESTOS PARA LAS MAMPOSTERÍAS EN ESTUDIO	73

CAPÍTULO 5	
APLICACIONES	77
5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS APLICACIONES.....	77
5.2 APLICACIÓN 1: DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA.....	77
5.3 APLICACIÓN 2: ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA REQUERIDA EN MUROS ESBELTOS PARA ALCANZAR CIERTO NIVEL DE DUCTILIDAD GLOBAL.....	82
5.4 APLICACIÓN 3: ANÁLISIS NO-LINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA DE 6 NIVELES.....	86
CAPÍTULO 6	
CONCLUSIONES	93
APÉNDICE A	95
REFERENCIAS	101

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La mampostería es uno de los materiales más económicos y por lo tanto es comúnmente empleado en México como elemento estructural para edificar construcciones. Sin embargo, en nuestro país es el menos popular en cuanto a su estudio en comparación a otros materiales como por ejemplo el concreto reforzado.

Las licenciaturas de Ingeniería Civil y Arquitectura de las instituciones a nivel superior de nuestro país, rara vez cuentan con gente especializada que imparta un curso de referente al comportamiento, análisis, diseño y construcción de estructuras de mampostería destinadas para varios usos y para todos los niveles sociales. Las fuentes bibliográficas extranjeras especializadas en el tema se basan en estudios con las características de las mamposterías empleadas en dichos países y por ende sus aplicaciones van de la mano con las normas y códigos de diseño vigentes de acuerdo al país de origen.

Una de las limitaciones para incorporar los avances que se ha logrado en los métodos de diseño y análisis estructural en el proceso de diseño de estructuras de mampostería es la falta de información experimental para mampostería fabricada en nuestro país. Por lo tanto, es necesario desarrollar investigación experimental encaminada a definir parámetros útiles para los métodos modernos de análisis.

En nuestro país los criterios y especificaciones de mayor uso para el análisis, diseño, construcción y detallado de elementos de mampostería se exponen a través de las normas técnicas complementarias para el diseño de estructuras de mampostería (NTCM-2004) del reglamento de construcciones del Distrito Federal (RCDF). Las modalidades de la mampostería que actualmente están consideradas en las NTCM-2004 son los muros diafragma, la mampostería confinada, la mampostería reforzada interiormente, la mampostería no confinada ni reforzada y la mampostería de piedras naturales.

Durante el sismo de 1985, las estructuras de mampostería en nuestro país mostraron en general un buen comportamiento (Suzuki y Kiremidjian, 1986) esto se debió a que la mayoría de las estructuras construidas eran de uno a tres niveles con una alta densidad de muros robustos. En años recientes se han comenzado a construir estructuras de mampostería cada vez más altas y esbeltas, debido a la falta de espacios y a la gran demanda de vivienda que existe en la Ciudad de México.

Una estructura de mampostería de baja altura se comporta primordialmente a corte pero si se aumenta la altura y por consiguiente la esbeltez de los muros el comportamiento a flexión comienza a ser importante. Este cambio de comportamiento puede conducir a mecanismos de falla inadecuados y a una disminución considerable de la sobrerresistencia (Valenzuela, 2010).

Si se desea estudiar el comportamiento de estructuras altas de mampostería se debe recurrir a modelos de análisis no lineal. Dentro de otra información experimental requerida dichos modelos requieren conocer la curva esfuerzo-deformación axial de la mampostería.

Dichas curvas han sido ampliamente estudiadas en otros países y en la literatura existen modelos desarrollados por diferentes investigadores (Priestley y Elder, 1982). Sin embargo, dado a que la resistencia y calidad de las mamposterías de tales países es mayor a las mamposterías usadas en México, es necesario desarrollar modelos aplicables a las mamposterías comúnmente utilizadas en nuestro país.

Aunque existen varios estudios que consideran mampostería fabricada en nuestro país (Meli y Reyes 1971, Meli y Hernández 1971) dichos estudios no tratan el comportamiento de la mampostería después de que se alcanza la deformación unitaria asociada a la resistencia máxima, por lo que la capacidad de deformación no está claramente definida.

El objetivo de esta tesis consiste en desarrollar con base en trabajo experimental modelos de comportamiento mecánico esfuerzo-deformación axial para tres tipos de mampostería comúnmente utilizada en nuestro país. Se consideran piezas comúnmente utilizadas en la ciudad de México como lo son ladrillo rojo recocido, tabicón y tabique extruido vertical de dos huecos.

El trabajo experimental desarrollado en esta tesis se presenta en seis capítulos:

En el capítulo 1, se da una breve descripción acerca de la situación actual referente al estudio y uso de la mampostería en nuestro país. Además, se plantea el objetivo de estudio de esta tesis y su contenido.

En el capítulo 2, se exponen los trabajos previos a esta tesis que sirvieron como base y fundamento teórico para realizar el estudio y programa experimental.

En el capítulo 3, se presenta el programa experimental que se desarrolló para lograr el objetivo de esta tesis. En él se marcan las variables en estudio y las características geométricas de los especímenes a ensayar, se indican las pruebas realizadas a los materiales usados en la construcción de los especímenes y se describe el proceso de fabricación de los muretes.

Se describen además las características de los dispositivos de carga y medición fabricados, el sistema de adquisición de datos utilizado y la máquina universal de ensayos empleada para todas las pruebas realizadas. Finalmente se explican los métodos considerados que se pusieron en práctica para obtener las curvas esfuerzo-deformación.

En el capítulo 4, se realiza un análisis de los resultados obtenidos y se comparan con los datos obtenidos por Meli y Hernández (1971) y se presentan los parámetros que definen las curvas ajustadas a los datos experimentales para definir los modelos analíticos.

En el capítulo 5, se presentan tres aplicaciones derivadas del uso de los modelos de las curvas esfuerzo-deformación presentados. En la primera aplicación se construyen diagramas momento-curvatura con los modelos propuestos para tres niveles de carga axial de un muro esbelto en planta baja de una estructura de 6 niveles. Los diagramas se comparan con otros

diagramas construidos con las curvas esfuerzo-deformación obtenidas por Meli y Hernández (1971) para los mismos tipos de piezas y la curva idealizada de las NTCM-2004.

En la segunda aplicación se hace un intento por predecir el posible estado de la mampostería de un muro sujeto principalmente a flexión en planta baja de una estructura de 6 niveles diseñada acorde a lo lineamientos de las NTCM-2004 para la modalidad de mampostería reforzada interiormente.

Finalmente, la tercera aplicación consiste en el análisis no lineal de una estructura de mampostería reforzada interiormente de 6 niveles.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones derivadas de este estudio experimental realizado para proponer los modelos de comportamiento mecánico esfuerzo-deformación axial.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 ESTUDIOS PREVIOS

En lo que respecta a las propiedades mecánicas de las mamposterías hechas en México D.F. y en el país puede considerarse como el principal antecedente el estudio realizado por Meli y Reyes (1971) cuyo objetivo fue *“Proponer algunos ensayos sencillos que permitan obtener índices de las propiedades mecánicas básicas, discutir sus ventajas y desventajas, y presentar los resultados de una serie de ensayos realizados en algunos materiales de uso común, con las conclusiones que de ellos se derivan y la propuesta de futuros estudios”*.

En dicho estudio se realizaron tres tipos de ensayos:

- 1) Compresión axial.
- 2) Tensión diagonal.
- 3) Esfuerzos tangenciales en la juntas.

Este estudio es muy importante ya que marca la pauta para otros estudios de mampostería en México así como para la elaboración de las NTCM del RCDF y de las normas mexicanas en lo referente a las pruebas de compresión axial y compresión diagonal, pues las especificaciones que se indican actualmente en tales documentos tienen su fundamento en las experiencias y conclusiones desarrolladas a partir de tal estudio. Aunque en este estudio se proporcionan algunas curvas esfuerzo-deformación para las mamposterías estudiadas, éstas sólo se desarrollaron hasta la deformación asociada al esfuerzo máximo debido a las limitaciones en la instrumentación que existían en ese momento y a la información que se requería para los tipos de análisis estructural para edificaciones de mampostería.

Otro antecedente importante es el estudio realizado por Meli y Hernández (1971) quienes realizaron un estudio estadístico que se centró en estudiar la calidad de las piezas de mayor uso para la fabricación de muros de mampostería de aquella época en el Distrito Federal. Dado que se tomaron en cuenta varios tipos de piezas de diferentes fabricantes, es un estudio que marcó las bases para definir los parámetros de algunas propiedades mecánicas que las piezas de mampostería deben cumplir con el objetivo obtener muros de mampostería de calidad aceptable. Nuevamente, en este estudio la curva esfuerzo-deformación sólo se obtuvo hasta la deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo desarrollado para cada tipo de mampostería con la diferencia de que la instrumentación utilizada permitió eliminar la deformaciones inducidas por el acomodamiento local del cabeceo y las juntas y las debidas a la flexibilidad de la máquina universal.

Como antecedente de trabajos realizados en otros países destaca el estudio de Priestley y Elder (1982) quienes obtuvieron la curva esfuerzo-deformación completa para las mamposterías empleadas en Nueva Zelanda. Además, propusieron modelos analíticos con base en la curva esfuerzo-deformación del modelo de Kent y Park para concreto simple. Sin

embargo, la mampostería de Nueva Zelanda es muy diferente, en cuanto a la calidad de las piezas, que la mampostería fabricada en México, lo cual hace que los valores de los parámetros empleados en los modelos desarrollados por Priestley y Elder (1982) no sean necesariamente aplicables a la mampostería fabricada en nuestro país.

2.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA

Para obtener la curva esfuerzo-deformación de la mampostería es necesario realizar ensayos de compresión sobre especímenes representativos de muros de mampostería. En México estos ensayos se realizan como lo indican las NTCM-2004 del RCDF, pero el método de prueba se especifica más claramente en la norma mexicana ONNCCE-2006.

El procedimiento sugerido en la normatividad se describe en las figuras 2.1 a 2.3. Como puede observarse en la figura 2.2, el registro de la deformación del elemento se realiza mediante transductores de desplazamiento unidos mediante un marco metálico y tornillos al espécimen.

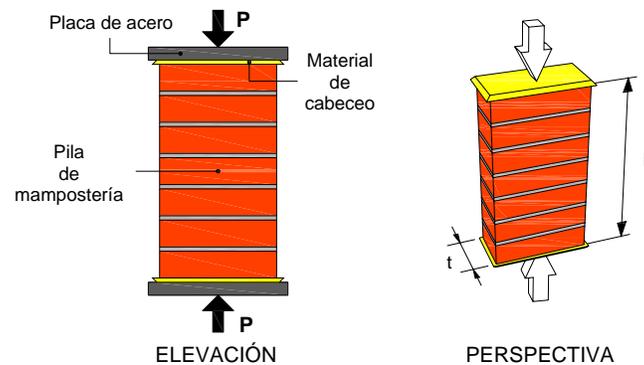


Figura 2.1. Pila para prueba a compresión
(Tomada de ONNCCE-2006)

En la figura 2.3 se muestra el procedimiento de cálculo del módulo de elasticidad de la mampostería.

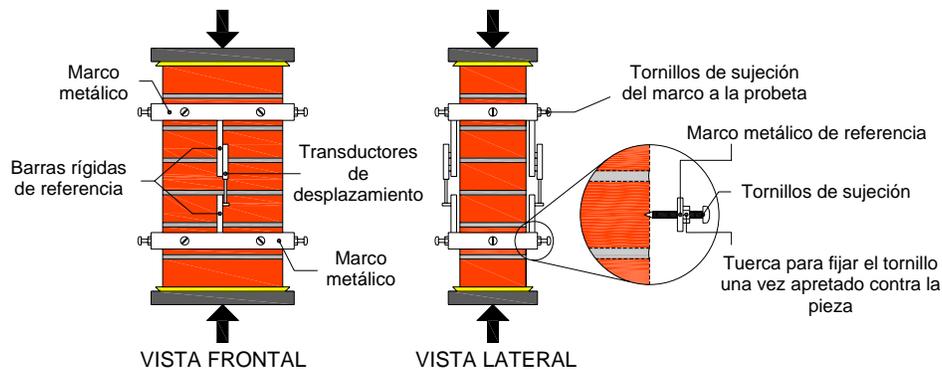


Figura 2.2. Dispositivo para medir el acortamiento longitudinal de una pila empleando marcos metálicos
(Tomada de ONNCCE-2006)

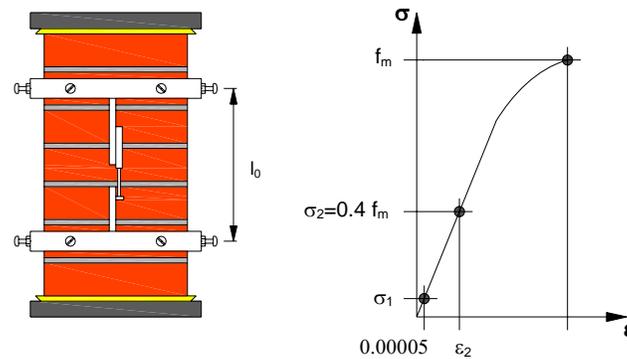


Figura 2.3. Determinación del módulo de elasticidad de la mampostería (Tomada de ONNCCE-2006)

Normalmente, en los estudios realizados para la obtención de propiedades mecánicas a compresión axial de la mampostería se utilizan las recomendaciones mostradas en las figuras 2.1 a 2.3, debido a que para fines de diseño estructural conforme a métodos de diseño elásticos por carga axial la única información requerida son el módulo de elasticidad y la resistencia máxima a compresión de la mampostería.

Sin embargo, cuando se desean utilizar métodos de análisis no-lineales se requiere información de la curva esfuerzo-deformación unitaria para deformaciones mayores a la deformación asociada al esfuerzo máximo a compresión. Esta información no puede ser obtenida en forma razonable con los dispositivos de medición mostrados en la figura 2.2 debido a que una vez que se alcanza el esfuerzo de compresión máximo el agrietamiento hace que el marco metálico gire respecto al espécimen y las lecturas de los transductores de desplazamiento dejan de ser confiables.

Por lo tanto, para los ensayos aquí reportados se utilizó un arreglo de instrumentación diferente al recomendado en la ONNCCE-2006.

2.3 MECANISMO DE FALLA DE LA MAMPOSTERÍA SUJETA A COMPRESIÓN AXIAL

2.3.1 Consideraciones

En esta sección se discute el mecanismo de falla que se observa en especímenes de mampostería sujetos a compresión axial, para lo cual, se hacen las consideraciones que se mencionan a continuación.

El mortero y las piezas tienen características esfuerzo-deformación distintas, tanto las piezas como el mortero sufren deformaciones verticales acompañadas de un alargamiento transversal, la adherencia y la fricción en las interfases de contacto entre los dos materiales impiden el desplazamiento relativo y obligan a que los dos tengan una misma deformación transversal que será intermedia entre las que tendrían si se deformasen libremente.

Por lo tanto, el mortero (que normalmente es el material más deformable) sufrirá compresiones en ambas direcciones transversales (compresión triaxial) mientras que las piezas sufrirán tensiones transversales.

La resistencia del mortero aumentará con respecto a la que se tendría en una prueba de compresión simple debido al estado de esfuerzos triaxial al que están sujetas las juntas.

Cualitativamente, se deduce que los esfuerzos transversales serán mayores cuanto mayor sea:

- 1) La diferencia entre los módulos de elasticidad respectivos.
- 2) El espesor de la junta.

2.3.2 Modos de falla

Los modos de falla que pueden presentarse en el espécimen son:

- a) Aplastamiento de las piezas. Es la falla menos común y depende de la calidad de la resistencia de la pieza, se presenta cuando las piezas de mampostería son de muy baja resistencia a la compresión axial en comparación con la resistencia a la compresión axial del mortero (figura 2.4).

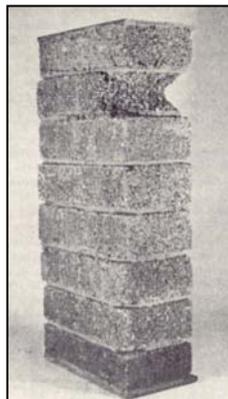


Figura 2.4. Falla por aplastamiento de las piezas
(Tomada de Meli y Reyes (1971))

- b) Agrietamiento vertical de las piezas. Es el modo de falla más común, se presenta cuando las deformaciones transversales que acompañan a la deformación longitudinal hacen que se generen esfuerzos de tensión en las caras laterales de las piezas mayores a su resistencia a tensión. Cuando el agrietamiento vertical se vuelve excesivo, se produce la inestabilidad del elemento y su falla (figura 2.5).



Figura 2.5. Falla por agrietamiento vertical de las piezas

El aplastamiento del mortero no ocasiona la falla cuando los esfuerzos son puramente axiales, ya que este, cuando se aplasta, es retenido por fricción por las piezas, y el conjunto puede soportar cargas mayores; sin embargo, en elementos esbeltos el aplastamiento del mortero puede provocar problemas de inestabilidad.

2.3.3 Modelo teórico de Hilsdorf, para predecir la resistencia a compresión de la mampostería

En modelo teórico de Hilsdorf, es un intento por tratar de predecir la resistencia a compresión simple de pilas de mampostería, fue desarrollado a partir del estudio de piezas sólidas de arcilla. Establece que a partir de los esfuerzos que se pueden desarrollar en la mampostería sujeta a compresión axial, se asume que los esfuerzos de tensión lateral σ_x y σ_z son iguales (Mayes y Clough, figura 2.6).

A continuación resumiremos la teoría de Hilsdorf según la presentan con detalle Mayes y Clough (1975).

Los esfuerzos σ_x y σ_z están dados como una función del esfuerzo local máximo σ_y , el cual actúa en la dirección de la aplicación de la carga externa. En la figura 2.7, la línea A representa el criterio de falla para la resistencia de un ladrillo sujeta a un estado triaxial de esfuerzos, mediante la combinación de los esfuerzos a compresión σ_y y de los esfuerzos laterales a tensión σ_x y σ_z , los cuales causan la falla local o agrietamiento del ladrillo.

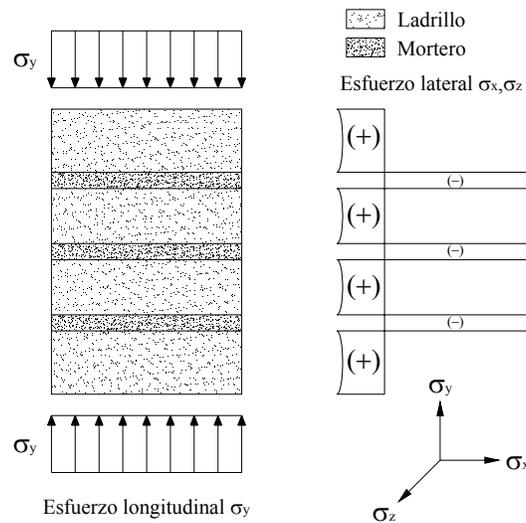


Figura 2.6. Distribución de esfuerzos idealizada en un espécimen de mampostería (Tomada de Mayes y Clough (1975))

Dado a que la forma exacta de la curva de criterio de falla es desconocida, podemos considerar razonablemente que los ladrillos de arcilla siguen la teoría de falla de Mohr sobre una línea recta, como se muestra en la figura 2.7. Si el esfuerzo de compresión aplicado al mortero es más grande que la resistencia a compresión de este mismo, el mortero tiende a ser confinado lateralmente. Por lo tanto un cierto esfuerzo de compresión lateral mínimo tiende a actuar sobre el mortero. Este esfuerzo es contrarrestado por un esfuerzo de tensión en las secciones no agrietadas de los ladrillos. Estos esfuerzos mínimos de tensión son representados por la línea C. Con un incremento de carga externa o de esfuerzo local, el esfuerzo de tensión lateral mínimo aumenta. Bajo las mejores condiciones, la falla de la mampostería ocurre cuando la resistencia a tensión lateral del ladrillo es más pequeña que el esfuerzo necesario para confinar al mortero. Por lo tanto la intersección del criterio de falla de la línea A y el esfuerzo lateral mínimo línea C corresponde a la última carga de la unidad de mampostería.

La expresión que define el criterio de falla de la línea A, se muestra en la ecuación (2.1):

$$\sigma_x = \sigma_z = \sigma_{tb} \left[1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{cb}} \right] \quad (2.1)$$

en donde σ_{cb} es la resistencia máxima a la compresión del ladrillo y σ_{tb} es la resistencia del ladrillo bajo tensión biaxial.

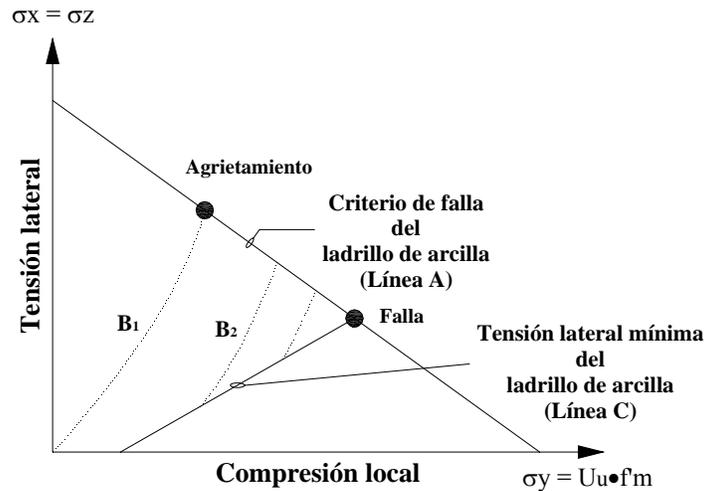


Figura 2.7. Criterio de falla de la mampostería de ladrillos de arcilla (Tomada de Mayes y Clough (1975))

En la figura 2.7 la línea C es el esfuerzo de tensión lateral mínimo, el cual actúa en el ladrillo para confinar al mortero, depende del comportamiento del mortero bajo compresión triaxial. Normalmente se supone que el comportamiento del mortero bajo compresión triaxial es similar al comportamiento del concreto simple sujeto a compresión triaxial.

A partir del estudio experimental efectuado sobre especímenes de concreto simple confinados, sujetos a un estado triaxial de esfuerzos por compresión simple que hicieron Richart, Brandtzaeg y Brown en 1928, se obtuvo que los datos experimentales obtenidos podrían ser ajustados con la ecuación (2.2):

$$f_1' = f'_c + 4.1\sigma_z \tag{2.2}$$

en donde f_1' es la resistencia a compresión de un cilindro de concreto lateralmente confinado, f'_c es la resistencia a compresión uniaxial de un cilindro de concreto y σ_z es el confinamiento lateral del cilindro.

Si la ecuación (2.2) es válida para morteros, entonces el confinamiento lateral mínimo de la junta de mortero se puede expresar con en la ecuación (2.3):

$$\sigma_{xm} = \frac{1}{4.1}(\sigma_y - \sigma_{cm}) \tag{2.3}$$

en donde σ_{xm} es el esfuerzo de compresión lateral en la junta del mortero, σ_y es el esfuerzo en la dirección Y y σ_{cm} es la resistencia a compresión uniaxial del mortero.

Por simplicidad se supone que el esfuerzo lateral de tensión en los ladrillos σ_{xb} y el esfuerzo lateral de compresión en las juntas de mortero σ_{xm} , se distribuye uniformemente sobre la altura de los ladrillos t_b y el espesor de la junta de mortero t_m . Entonces por equilibrio de fuerzas tenemos la ecuación (2.4):

$$\sigma_{xb}t_b = \sigma_{xm}t_m \quad (2.4)$$

Sustituyendo la ecuación (2.3) en la ecuación (2.4) se tiene la expresión para la línea C (ecuación 2.5):

$$\sigma_{xb} = \frac{t_m}{4.1t_b} (\sigma_y - \sigma_{cm}) \quad (2.5)$$

Igualando las ecuaciones (2.1) y (2.5) obtenemos la magnitud del esfuerzo máximo local en la falla σ_y , la cual define la intersección de las líneas A y C (figura 2.2), la expresión del esfuerzo local en la falla se muestra con la ecuación (2.6):

$$\sigma_y = \sigma_{cb} \frac{4.1\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cm}}{4.1\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cb}} \quad (2.6)$$

en donde $\alpha = \frac{t_m}{t_b}$

Usando el coeficiente de no uniformidad en la falla U_U , el esfuerzo nominal promedio de la mampostería en la falla puede expresarse con la ecuación (2.7) como:

$$\sigma_{ym} = f'_m = \frac{\sigma_y}{U_U} = \frac{\sigma_{cb}}{U_U} \frac{4.1\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cm}}{4.1\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cb}} \quad (2.7)$$

si hacemos $\Phi = \frac{\sigma_{cb}}{\sigma_{tb}}$, la ecuación (2.7) cambia para tener finalmente la expresión que predice

la resistencia nominal promedio a compresión de pilas de mampostería, acorde al modelo teórico de Hilsdorf (ecuación 2.8):

$$f'_m = \frac{\sigma_{cb}}{U_U} \frac{4.1 + \alpha \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{tb}}}{4.1 + \alpha\Phi} \quad (2.8)$$

En la ecuación (2.9), se muestra la ecuación (2.8) normalizada con respecto a la resistencia a compresión de la pieza.

$$\rho = \frac{f'_m}{\sigma_{cb}} = \frac{1}{U_U} \frac{4.1 + \alpha \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{tb}}}{4.1 + \alpha\Phi} \quad (2.9)$$

A partir del modelo teórico de Hilsdorf se deduce que la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m) se incrementa con el aumento de la resistencia a compresión de ladrillos (σ_{cb}) y del mortero (σ_{cm}), con el incremento de la resistencia a tensión de los ladrillos (σ_{tb}) y con la disminución en la relación del espesor de la junta a espesor del ladrillo ($\alpha = t_m/t_b$). U_U no es una constante pero depende de un número de parámetros incluyendo el espesor de la junta y la resistencia del mortero.

Una comparación de la resistencia analítica y experimental resultantes son presentados en la figura 2.8, en dicha figura se observa que con el modelo teórico de Hilsdorf la resistencia a compresión de los especímenes ensayados puede ser predicha dentro de $\pm 20\%$ de los valores reales. Cabe señalar que Mayes y Clough (1975) ensayaron piezas de manufactura norteamericana, con un gran control de calidad.

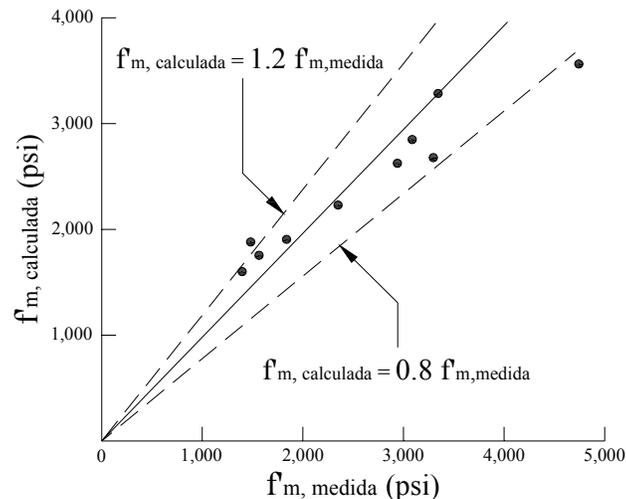


Figura 2.8. Comparación de los valores de las resistencia de mampostería medida contra calculada (Tomada de Mayes y Clough (1975))

Hilsdorf concluyó, que antes de aplicar la ecuación (2.8) deben ser consideradas varias propiedades características de la mampostería:

- (1) El coeficiente de no-uniformidad como una función de:
 - a) Calidad de la mano de obra.
 - b) Tipo y resistencia a compresión del mortero.
 - c) Tipo de ladrillo.
 - d) Configuración de la mampostería y corazón de los ladrillos.
 - e) Espesor de las juntas.
- (2) Comportamiento de los ladrillos y morteros sujetos a estados triaxiales definidos.
- (3) Relación entre la resistencia de ladrillos bajo tensión biaxial, uniaxial y flexión.

2.3.4 Factores que influyen en la resistencia a compresión de la mampostería.

- **Resistencia de la pieza**

Se ha observado que es la propiedad que más domina en la resistencia a compresión de la mampostería ya que a mayor resistencia de las piezas mayor resistencia de las pilas (Meli y Reyes 1971, Meli y Hernández 1971, Mayes y Clough 1975, Priestley y Elder 1982) debido a que piezas con alta resistencia a compresión tienden a resistir mayores esfuerzos de tensión antes de agrietarse.

- **Tipo de mortero.**

El mortero tiene como finalidad unir las piezas de mampostería formando un conjunto que actué como un elemento integral, para ello el mortero en su etapa plástica depende de ciertas propiedades antes y después de ser colocado como lo son su trabajabilidad, su fluidez y su capacidad para retener agua. Conforme el mortero va endureciendo este alcanza una edad en la cual sus propiedades de rigidez y resistencia son óptimas, sin embargo cuando trabaja en conjunto con las piezas de mampostería la adherencia es la propiedad más importante que permite mantener una liga resistente y duradera entre la unión mortero-pieza. Así mismo la rugosidad y las cavidades o alvéolos que existen en las caras de la pieza y que están en contacto con el mortero fomentan que la adherencia sea mayor. La adherencia entre el mortero y las piezas es una propiedad importante en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería.

En nuestro país los morteros empleados para pegar las piezas de los muros de mampostería se elaboran al mezclar uniformemente de forma manual o por medio mecánico un cementante (cemento hidráulico o cemento de albañilería), arena y agua. Además, se permite el uso de cal hidratada la cual reduce la resistencia a compresión del mortero y aumenta la retentividad de agua del mismo, esto nos brinda una mejor trabajabilidad en el manejo del mortero y una mejoría de la adherencia entre el mortero y la pieza.

A partir de los estudios realizados en los años 70's, en México D.F., se ha observado que:

- El mortero empleado no tiene una importancia decisiva en la resistencia a compresión de la mampostería. Pilas construidas con mortero de cemento y arena 1:3 dieron resistencias consistentemente mayores que las fabricadas con otros morteros, pero en pocos casos fue considerable; para los otros morteros empleados no existe una diferencia notable, a pesar de que sus resistencias varían en un intervalo muy amplio (Meli y Reyes, 1971).
- La calidad del mortero no tiene una influencia decisiva en la resistencia a compresión de la pila (Meli y Hernández, 1971).

- **Espesor de las juntas de albañilería**

El incremento en el espesor de la juntas disminuye la resistencia como lo reportan Mayes y Clough (1975) a través de los estudios de Francis, Horman y Jerreems (1970) y del Structural Clay Products Research Foundation (1965).

A partir del estudio de Francis, Horman y Jerreems (1970), se reportan los resultados experimentales del ensaye de prismas hechos con piezas de ladrillo sólidas y perforadas, los resultados experimentales son comparados con una expresión analítica propuesta por los autores que intenta predecir la resistencia a compresión de pilas de mampostería (figura 2.9).

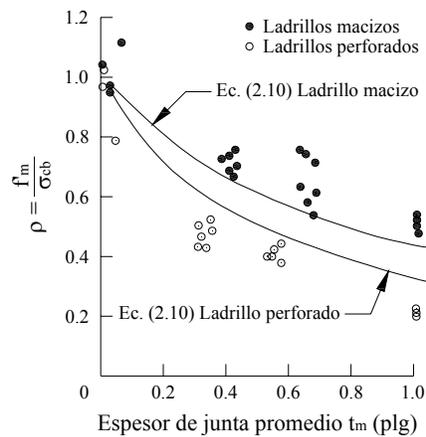


Figura 2.9. Variación de ρ contra el espesor de junta (Tomada de Mayes y Clough (1975))

En la figura 2.9, se observa como al incrementar el espesor de la junta la resistencia del espécimen disminuye; también se observa como la expresión analítica sobreestima la resistencia de los prismas de piezas huecas y subestima la resistencia de los prismas de piezas sólidas. Note que para los tamaños de junta normalmente utilizados el efecto del espesor de la junta en la resistencia es moderado.

La expresión analítica con la cual se comparan los datos experimentales se muestra en la ecuación (2.10):

$$\rho = \frac{f'_m}{\sigma_{cb}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha\Phi(\beta\nu_m - \nu_b)}{\beta(1 - \nu_m)}} \quad (2.10)$$

en donde $\beta = E_b/E_m$, es la relación modular, E_b es el módulo de elasticidad de la pieza, E_m es el módulo de elasticidad del mortero, ν_b es la relación de Poisson de la pieza, ν_m es la relación de Poisson del mortero. Las variables restantes se definieron en el modelo teórico de Hilsdorf.

Del estudio del Structural Clay Products Research Foundation (1965), se muestra una tabla donde se indican los resultados experimentales obtenidos de ensayar prismas de piezas de arcilla (tabla 2.1)

Tabla 2.1. Disminución de la resistencia con el incremento en el espesor la junta Structural Clay Products Research Foundation (1965) (Tomada de Mayes y Clough (1975))

Junta de mortero espesor (plg) ²	Prismas ¹	Relación resistencia
	Resistencia a la compresión ³	
1/4	6550 psi	1.00
3/8	5850 psi	0.89
1/2	4900 psi	0.75
5/8	4050 psi	0.62
3/4	3150 psi	0.48

¹ Prismas de 4 plg. de ancho, 8 plg. de largo y 16 plg. de alto.

² Se usó mortero tipo S en todos los especímenes.

³ Valores tomados del ajuste de una curva obtenida a partir de dos graficas.

En dicha tabla se observa como la relación de la resistencia, tomando como parámetro de normalización la resistencia de los prismas hechos con espesor de junta de ¼ plg se ve disminuida conforme se aumenta el espesor de la junta.

▪ **Velocidad de carga**

Al igual que en los ensayos a compresión axial sobre cilindros de concreto simple, a mayor velocidad de carga aplicada durante el ensayo de prismas de mampostería, existe un incremento en la resistencia registrada en los especímenes. Priestley y Elder (1982) realizaron ensayos de compresión sobre pilas de mampostería comparando una velocidad de carga alta y otra baja. Los datos obtenidos de las pruebas experimentales se ajustaron a un modelo modificando la curva esfuerzo-deformación de Kent-Park para concreto simple (figura 2.10).

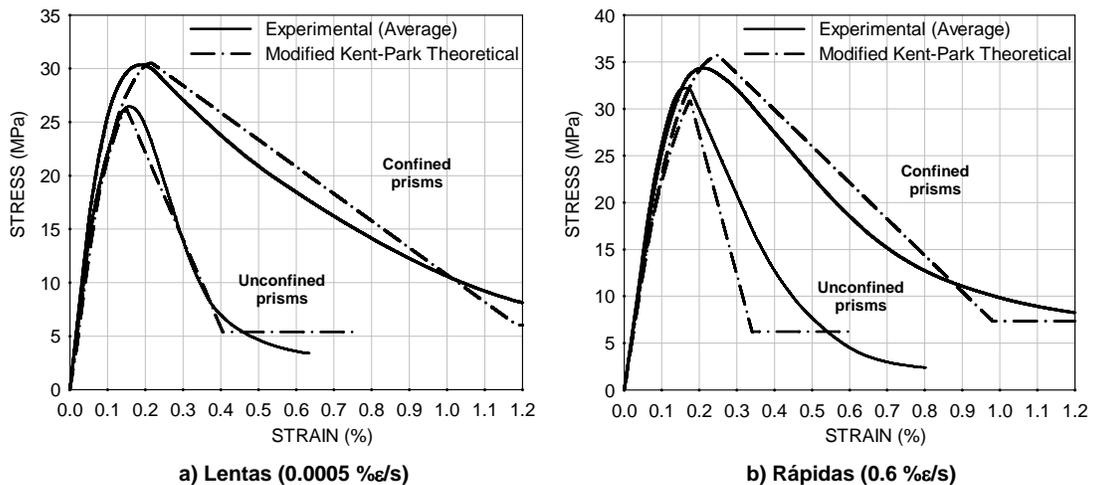


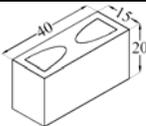
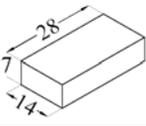
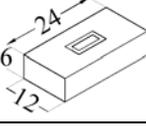
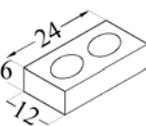
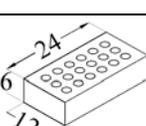
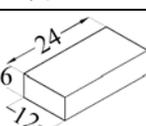
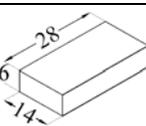
Figura 2.10. Curvas esfuerzo-deformación teórica y experimental (Tomada de Priestley y Elder (1982))

2.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN MÉXICO D.F. Y EN NUEVA ZELANDA

2.4.1 Meli y Reyes (1971)

Realizaron pruebas de compresión axial sobre siete tipos de piezas, las cuales no fueron seleccionadas mediante un muestreo, ya que los lotes de las piezas fueron enviados por la institución patrocinadora de la investigación. En ese entonces la institución patrocinadora estaba interesada en las propiedades de las siete piezas. En la tabla 2.2, se muestran las características geométricas y mecánicas de las piezas en estudio.

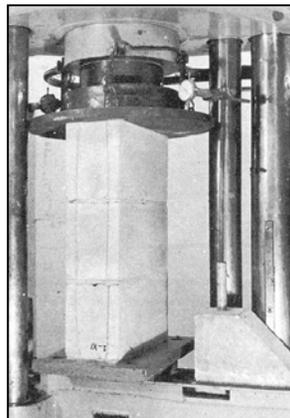
**Tabla 2.2. Propiedades de las piezas
(Tomada de Meli y Reyes (1971))**

Tipo pieza	Geometría	Resistencia a compresión, en kg/cm ²	Absorción, en porcentaje
Bloque de Concreto		110	10
Tabique de Barro recocido		70	27
Tabique de Barro prensado		146	20
Tabique hueco de barro Compresible		216	16
Tabique perforado vertical		183	--
Tabique silico Calcáreo		158	--
Tabique Asfáltico		39	--

Para determinar la resistencia a compresión axial de las piezas y la absorción de las mismas, se tomaron seis especímenes de cada tipo de pieza. Las pruebas fueron realizadas como lo indica la norma ASTM C67.

Se construyeron pilas por un mismo operario, con una relación de esbeltez h/t aproximadamente igual a cuatro, se utilizaron morteros con diferente proporcionamiento fabricados con cemento de resistencia rápida, cal hidráulica hidratada, cemento de albañilería y arena cribada por la malla número 4. Las cantidades de los materiales empleados para la fabricación de los morteros se determinó por volumen; la cantidad de agua no se midió, sino que el operario agregaba la cantidad de agua necesaria para que la mezcla tuviese una manejabilidad adecuada. Periódicamente se controlaba la fluidez de las mezclas, encontrando valores que se mantenían consistentemente en un intervalo entre 125 y 130 por ciento. Por cada serie de especímenes de ensaye se fabricaban nueve cubos de muestra, de 5 cm de lado para ser ensayados a la compresión.

Las piezas de barro se saturaron en agua y las piezas de otros materiales se colocaron en su estado de humedad en que se encontraba a dicha temperatura ambiente. Las pilas se construyeron cuidando la verticalidad de una de sus caras y nivelando cada pieza al colocarla; se conservaron en el interior del laboratorio por 14 días sin someterlas a ningún proceso de curado. Las pilas se cabecearon en las caras superior e inferior con azufre, antes de empezar el ensaye las pilas fueron precargadas en un 20% de su resistencia, para eliminar al máximo las deformaciones locales por reacomodo de cabeceo y de las juntas. Se midieron las deformaciones totales de la pila entre las cabezas de la máquina por medio de dos micrómetros como se muestra en la figura 2.11, que permitían además detectar excentricidades iniciales en la aplicación de la carga y corregirlas en la etapa de precarga. Los especímenes se llevaron a la falla en un tiempo del orden de tres minutos, midiendo las deformaciones en aproximadamente diez puntos intermedios.



**Figura 2.11. Ensaye de compresión en pilas
(Tomada de Meli y Reyes (1971))**

En la tabla 2.3, se indican los resultados de los ensayos a compresión y en la figura 2.12 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de los datos experimentales.

**Tabla 2.3. Resultados de los ensayos a compresión
(Tomada de Meli y Reyes (1971))**

Pieza	f_p (kg/cm ²)	Proporción Mortero	f_j (kg/cm ²)	f_m (kg/cm ²)	f_m/f_p	E (kg/cm ²)	E/ f_m	ϵ_u	ϵ_u/ϵ_e
Tabique de barro recocido	70	1 0 3	184	33	0.46	10,000	300	0.0055	1.6
		1 1 6	92	35	0.5	9,000	250	0.005	1.3
		0 1M 3	81	29	0.42	8,000	280	0.0045	1.2
		0 1 3	5	21	0.3	5,000	240	0.006	1.5
Bloque de concreto	110	1 0 3	204	77	0.69	3,000	400	0.0025	1
		1 1 6	152	69	0.62	28,000	410	0.003	1.1
		0 1M 3	78	67	0.61	23,000	350	0.0035	1.1
		0 1 3	5	68	0.62	15,000	220	0.004	0.9
Tabique hueco de barro	216	1 0 3	204	99	0.46	22,000	230	0.005	1.1
		1 1 6	92	78	0.36	24,000	300	0.0045	1.4
		0 1M 3	85	64	0.3	14,000	210	0.005	1.1
		0 1 3	5	72	0.33	11,000	160	0.006	1
Tabique perforado vertical	183	1 0 3	206	86	0.47	15,000	175	0.006	1.1
		1 0 6	97	64	0.35	14,000	240	0.005	1.1
		1 1/2 5	117	69	0.37	16,000	240	0.004	1.1
Tabique sílico calcáreo	158	1 0 3	211	95	0.63	23,000	240	0.006	1.6
		1 0 6	97	87	0.55	16,000	150	0.007	1.3
		1 1/2 5	117	83	0.53	19,000	230	0.007	1.6
Tabique asfáltico	39	1 0 3	206	26	0.67	9,000	330	0.003	1.1
		1 0 6	128	25	0.62	9,000	360	0.003	1
		1 1/2 5	132	20	0.5	8,000	420	0.003	1.2

f_p = Resistencia a compresión de la pieza.

f_j = Resistencia a compresión del mortero.

f_m = Resistencia a compresión de la pila.

E = Módulo de elasticidad de la pila.

ϵ_u = Deformación unitaria a la carga máxima.

ϵ_e = E/ f_m .

Esfuerzos sobre áreas brutas, cada valor es promedio de tres ensayos. El área bruta es resultante de multiplicar el largo por el ancho de la pieza.

Las proporciones del mortero se indican como: Cemento: Cal: Arena; la letra M indica cemento de albañilería.

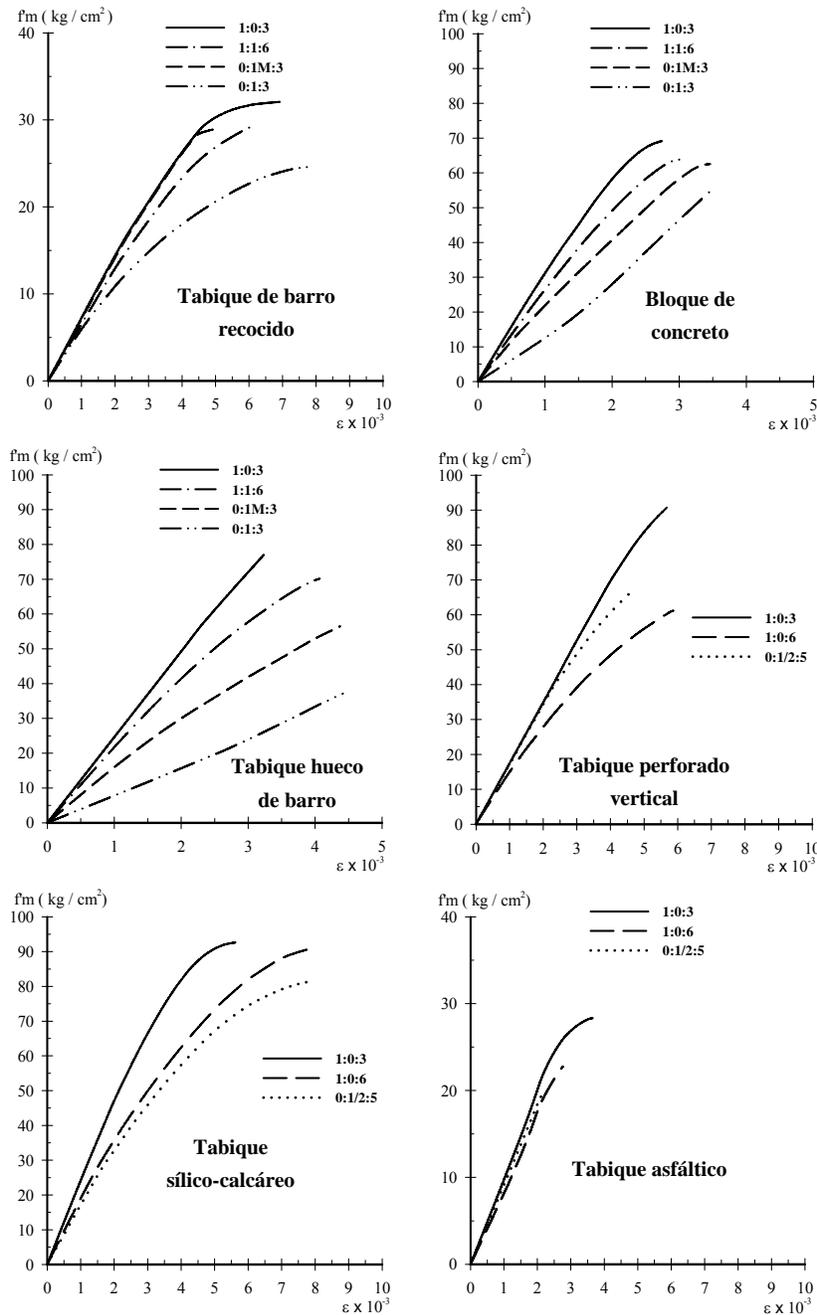


Figura 2.12. Curvas esfuerzo-deformación para compresión axial (Tomada de Meli y Reyes (1971))

Los autores reportan que las deformaciones unitarias presentadas en las curvas de la figura 2.12, fueron medidas sobre la altura total de los especímenes, por lo que estas incluyen los efectos del reacomodo del cabeceo y de las juntas, así como del movimiento de la máquina universal. Realizando mediciones en las zonas intermedias de las pilas, se observó que los módulos reales son de un 30% a 70% mayores que los módulos obtenidos a partir de la instrumentación sobre la altura total del espécimen.

2.4.2 Meli y Hernández (1971)

En este trabajo se estudiaron una gama más amplia de tipos de piezas empleadas para la construcción de muros de mampostería.

En lo referente al muestreo, este se realizó en cuatro etapas, en la primera se menciona que fue una etapa exhaustiva ya que se llevó a cabo en 48 piezas de distinta procedencia, para cada pieza se determinaron la resistencia a compresión y la absorción después de estar sumergidas durante 24 hrs. en agua. Se construyeron pilas de mampostería empleando tres tipos de mortero y se obtuvieron las resistencias a compresión de los morteros así como la resistencia a compresión de los prismas de mampostería.

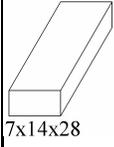
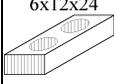
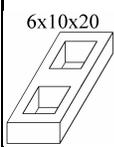
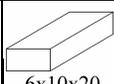
En la segunda etapa el número de piezas estudiadas se redujo a 34 y sólo se construyeron pilas con dos tipos de mortero; en la tercera etapa sólo se consideraron 13 tipos de piezas y no se efectuaron ensayos de pilas; finalmente en la cuarta etapa se aprobaron 11 tipos de piezas y no se realizaron ensayos en pilas.

La razón por la cual el número de piezas se redujo en cada etapa de muestreo fue porque en la primera etapa se deseaba examinar la variación de las propiedades de las piezas de características semejantes para distintas procedencias, en las etapas posteriores se estudió la variación en piezas de una misma procedencia obtenidas en distintos periodos.

Las fábricas de origen de las piezas, se seleccionaron tomando en cuenta: su volumen de producción, grado de mecanización y nivel de control de calidad. Todas las fábricas se encontraban en las cercanías del Distrito Federal.

Las piezas se obtuvieron directamente en los patios de almacenamiento de las fábricas, escogiéndolas al azar de los diferentes lotes existentes, cada muestra extraída constaba de 100 piezas. Entre una y otra etapa de muestreo transcurrieron aproximadamente tres meses, lapso en que se consideró que los lotes ya muestreados serían reemplazados, aun para los materiales de menor consumo. En la tabla 2.4, se muestran las características físicas y geométricas de las piezas consideradas, así como los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas.

**Tabla 2.4. Resultados de ensayos en piezas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))**

Material	Geometría*	Procedencia	Clasificación	A _n /A _b	f _p (kg/cm ²) (1)				C (%)				Abs. (%)	γ _s (2)	
					Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV			
Tabique rojo recocido		T1	B	1	52	64	56	58	26	23	24	19	20	1.45	
		T2	C	1	52				29					24	1.37
		T3	C	1	51				34					25	1.37
		T4	B	1	114	112	109		34	25	23			21	1.55
		T5	C	1	80	64			21	17				25	1.38
		T6	C	1	85	109			23	52				21	1.5
		T7	C	1	93	76	66	88	58	19	24	11		25	1.45
		T8	C	1	33				32					26	1.34
		T9	C	1	53				45					26	1.4
		T10	C	1	45	43	47	55	28	22	10	21		25	1.4
		T11	C	1	36	45	51	45	32	28	20	28		27	1.31
Tabique extruido perforado verticalmente		TE1	A	0.57	215	226			8	11			16	1.79	
		TE2	A	0.63	428	361	394	295	14	25	20	15	10	1.96	
		TE3	B	0.69	225				17					19	1.65
		TE4	B	0.59	181	156			16	15				17	1.75
		TE2	A	0.67	376	308	365	329	11	15	16	15	12	1.85	
		TE3	B	0.59	169				24				20	1.61	
		TE5	A	0.65	486	473	575	540	21	19	15	20	4	2.06	
		TE1	A	0.57	129	143			15	15			17	1.66	
		TE5	A	0.59	426	400			26	11			6	2.2	
		TE4	B	0.65		417				12				7	2.02
Tabique extruido macizo		TE1	A	1	454	375			13	15			16	1.73	
		TE5	A	1	890	905			14	8			5	2.05	
Tabique extruido huecos horizontales		TE1	A	1	77				13				17	1.32	
		TE4	B	1	75				18				15	1.25	
		TE1	A	1		79				30			16	1.78	
		TE4	B	1	56	49			21	16			16	1.69	

f_p = Resistencia promedio de la pieza.

* = Medidas nominales.

C = Coeficiente de variación.

(1) = Sobre área bruta medida.

γ_s = Peso volumétrico seco.

(2) = Sobre volumen neto.

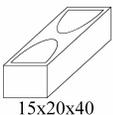
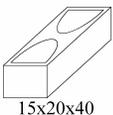
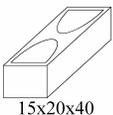
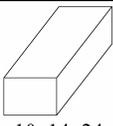
A = Fábrica grande y adecuado control de calidad.

B = Fábrica mediana y nulo control de calidad.

C = Fábrica rudimentaria.

A_n/A_b = Relación de área neta sobre área bruta.

Continuación, Tabla 2.4. Resultados de ensayos en piezas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))

Material	Geometría	Procedencia	Clasificación	A_n/A_b	f_p (kg/cm ²) (1)				C (%)				Abs. (%)	γ_s (2) (ton/m ³)
					Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
Bloque ligero		B1	A	0.56	37	35			10	12			29	1.21
		B2	A	0.59	42	49			16	12			35	1.09
		B3	A	0.63	43	41			24	22			24	1.23
		B4	B	0.54	17				23				33	1.01
		B1**	A	1	44	42			17	26			40	0.95
Bloque intermedio		B1	A	0.56	62	77			24	7			15	1.61
		B2	A	0.59	41	74			14	14			21	1.5
		B3	A	0.61	82	80			28	21			15	1.7
		B4	B	0.54	21				20				27	1.32
		B5	C	59	40			18					16	1.45
Bloque pesado		B1	A	0.56	135	101			31	15			9	2.12
		B2	A	0.59	146	143	132	108	23	10	28	7	11	2.15
		B3	A	0.63	100	128	104	81	20	21	20	15	10	2.09
		B4	B	0.54	71				13				14	1.79
Tabicón		TC1	B	1	31	65	68	42	24	14	11	15	25	1.45
		TC2	A	1	76	123	66	101	35	34	19	17	27	1.42
		TC3	B	1	59	63			23	27			19	1.42
		TC4	B	1	36				23				28	1.05
		TC5	C	1	48	56			36	22			16	1.6
Sílico - calcáreo	7x12x24	S	A	1	201	177			15	11			15	1.79

f_p = Resistencia promedio de la pieza.

* = Medidas nominales.

** = Bloque macizo.

C = Coeficiente de variación.

(1) = Sobre área bruta medida.

γ_s = Peso volumétrico seco.

(2) = Sobre volumen neto.

A = Fábrica grande y adecuado control de calidad.

B = Fábrica mediana y nulo control de calidad.

C = Fábrica rudimentaria.

A_n/A_b = Relación de área neta sobre área bruta.

En lo que respecta a la elaboración de los especímenes y al proceso de la prueba, éste se realizó como se indica en Meli y Reyes (1971). Para reportar las curvas esfuerzo deformación de las mamposterías se midieron las deformaciones en la parte central de las pilas, pues de esta manera se elimina el efecto que induce el reacomodo del cabeceo de las pilas y de las juntas de mortero (figura 2.13). Los resultados experimentales obtenidos de la pruebas a compresión axial sobre pilas de mampostería se muestran en la tabla 2.5.

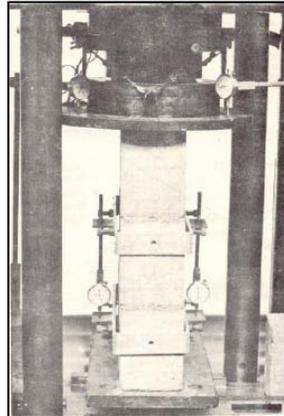


Figura 2.13. Dispositivo para ensaye de pilas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))

Tabla 2.5. Resultados de los ensayos a compresión en pilas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))

Material	Procedencia	Mortero	PRIMERA ETAPA						SEGUNDA ETAPA					
			f _i	f _p	f _m	E	f _m /f _p	E/f _m	f _i	f _p	f _m	E	f _m /f _p	E/f _m
Tabique rojo recocido 7 x 14 x 28	T1	I	166	52	21	5	0.4	260	135	64	30	8	0.47	250
		II	121		27	6	0.52	230			32	8	0.49	260
		III	30		21	6	0.4	270						
	T2	I	157	52	29	7	0.53	230						
		II	105		30	7	0.58	230						
		III	75		30	7	0.59	240						
	T3	I	166	51	43	9	0.85	220						
		II	121		37	6	0.72	170						
		III	30		40	11	0.77	290						
	T4	I	161	114	59	15	0.52	250	135	112	54	12	0.48	220
		II	117		56	14	0.49	240	68		56	11	0.49	200
		III	90		45	10	0.4	230	40		42	12	0.65	270
	T5	I	163	80	49	13	0.61	270	125	64	42	12	0.65	270
		II	94		30	11	0.38	340	40		40	10	0.62	260
		III	93		31	9	0.38	280	40		40	10	0.62	260
	T6	I	163	85	26	8	0.31	290	125	109	39	12	0.35	300
		II	94		34	10	0.4	300	40		49	14	0.44	290
		III	93		30	10	0.36	350	40		49	14	0.44	290
T7	I	108	93	46	14	0.49	310	125	76	38	11	0.49	280	
	II	90		35	11	0.37	310	40		42	12	0.55	280	
	III	58		31	9	0.33	280	40		42	12	0.55	280	
T8	I	157	33	16	5	0.48	280							
	II	105		16	5	0.48	340							
	III	75		18	6	0.54	330							
T9	I	158	53	31	9	0.58	300							
	II	117		24	7	0.46	290							
	III	67		36	8	0.65	230							
T10	I	157	45	23	4	0.51	170	140	43	18	5	0.4	300	
	II	105		22	5	0.58	240	64		16	5	0.36	320	
	III	75		22	5	0.49	210	40		13	5	0.28	360	
T11	I	166	36	16	4	0.45	270	125	45	12	4	0.27	350	
	II	121		16	4	0.43	240	40		13	5	0.28	360	
	III	22		18	6	0.48	320							

f_i = Resistencia media del mortero (kg/cm²).
 f_p = Resistencia media de la pieza (kg/cm²).
 f_m = Resistencia promedio de la pila (kg/cm²).
 E = Módulo de elasticidad promedio (ton/cm²).
 Mortero I = 1:0:3 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)
 Mortero II = 1:1/2:4 1/2 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)
 Mortero III = 1:1:6 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Continuación, Tabla 2.5. Resultados de los ensayos a compresión en pilas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))

Material	Procedencia	Mortero	PRIMERA ETAPA						SEGUNDA ETAPA						
			fi	fp	fm	E	fm/fi	E/fm	fi	fp	fm	E	fm/fi	E/fm	
Tab. extruido macizo	6 x 10 x 20	TE1	I	158	454	188	47	0.41	250	156	375	226	55	0.6	240
			II	117		168	47	0.37	280						
			III	67		135	21	0.3	150			80	194	45	0.55
	TE5	I	161	485	138	0.54	280								
		II	117	483	121	0.59	250								
		III	90	495	93	0.55	190								
Tabique extruido, huecos horizontales	6 x 12 x 24	TE1	I	157	77	37	10	0.47	260						
			II	105		33	11	0.43	340						
			III	75		30	11	0.38	370						
		TE4	I	166	35	8	0.46	220							
			II	121	25	7	0.33	270							
			III	30	29	9	0.38	310							
	10 x 12 x 24	TE1	I							140	79	32	9	0.41	270
			II						49	21		9	0.27	400	
			III												
		TE4	I	163	28	9	0.5	300	158	49	29	11	0.58	370	
			II	94	36	8	0.63	240							
			III	93	35	10	0.63	270			42	23	9	0.46	380
Tabique extruido, huecos verticales	6 x 12 x 24	TE1	I	158	215	113	27	0.53	240	140	226	107	31	0.47	280
			II	117		104	26	0.48	250						
			III	67		120	26	0.56	220			50	72	18	0.31
		TE2	I	158	167	42	0.38	260	92	361	128	44	0.35	330	
			II	117	127	34	0.3	280							
			III	67	155	31	0.36	200			52	116	40	0.32	340
		TE3	I	1085	96	31	0.42	320							
			II	90	89	24	0.4	260							
			III	58	97	25	0.43	250							
		TE4	I	166	98	29	0.54	300	144	156	97	27	0.62	270	
			II	121	99	25	0.54	250							
			III	30	76	15	0.42	200			82	80	24	0.51	300
	6 x 10 x 20	TE2	I	158	233	52	0.62	220	92	308	174	52	0.56	290	
			II	117	115	36	0.3	320							
			III	67	98	24	0.26	240			52	133	39	0.43	290
		TE3	I	108	124	25	0.73	240							
			II	90	92	19	0.54	210							
			III	58	110	22	0.65	200							
TE5	I	161	260	91	0.53	350	160	473	197	91	0.41	460			
	II	117	204	60	0.42	300									
	III	90	183	43	0.38	220			49	234	54	0.49	230		
10 x 10 x 20	TE1	I	157	87	21	0.68	270	140	143	88	22	0.61	240		
		II	105	74	19	0.54	260								
		III	75	67	18	0.52	270			49	59	20	0.41	230	
	TE5	I	161	281	71	0.66	250	118	400	197	63	0.49	320		
		II	117	312	56	0.73	180								
		III	90	268	43	0.63	160			38	149	51	0.37	340	
10 x 12 x 24	TE4	I							144	417	181	97	0.43	530	
		II						82	145		55	0.34	370		
		III													
	TE5	I	161	489	288	80	0.59	280	118	466	206	82	0.44	390	
		II	117	239	74	0.5	310								
		III	90	183	62	0.37	340	38			179	61	0.38	340	

fi = Resistencia media del mortero (kg/cm²).

fp = Resistencia media de la pieza (kg/cm²).

fm = Resistencia promedio de la pila (kg/cm²).

E = Módulo de elasticidad promedio (ton/cm²).

Mortero I = 1:0:3 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Mortero II = 1:1/2:4 1/2 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Mortero III = 1:1:6 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

**Continuación, Tabla 2.5. Resultados de los ensayos a compresión en pilas
(Tomada de Meli y Hernández (1971))**

Material	Procedencia	Mortero	PRIMERA ETAPA						SEGUNDA ETAPA								
			fj	fp	fm	E	fm/fp	E/fm	fj	fp	fm	E	fm/fp	E/fm			
Bloque de concreto ligero	20 x 15 x 40	B1*	I	177		30	14	0.74	460	188		28	14	0.81	470		
			II	142	37	29	12	0.77	410		35						
			III	114		28	11	0.75	390	72		29	15	0.82	520		
		B2	I	182		35	14	0.83	390	188		39	18	0.79	450		
			II	139	42	36	14	0.85	390		49						
			III	121		30	12	0.70	390	72		37	18	0.74	480		
		B3	I	178		37	18	0.85	500	209		34	18	0.83	520		
			II	120	43	30	16	0.70	540		41						
			III	88		32	18	0.73	570	90		42	20	1.01	480		
		B4	I	177		12	8	0.67	650								
			II	142	17	13	7	0.76	530								
			III	114		11	6	0.62	580								
		B5	I	177		26	11	0.59	430	81		27	13	0.64	480		
			II	142	44	27	11	0.60	420		42						
			III	114		26	11	0.58	450	46		25	11	0.59	440		
		Bloque de concreto intermedio	20 x 15 x 40	B1	I	177	62	35	16	0.57	450	81		54	25	0.70	460
					II	142		36	17	0.58	470		77				
					III	114		37	18	0.60	480	46		47	19	0.60	400
B2	I			182		31	12	0.75	400	188		55	29	0.74	520		
	II			139	41	33	13	0.80	410		74						
	III			121		33	13	0.80	370	72		47	27	0.63	580		
B3	I			178		49	26	0.59	520	156		49	28	0.61	570		
	II			120	82	49	21	0.59	440		80						
	III			88		44	21	0.54	480	80		53	31	0.66	570		
B4	I			182		16	8	0.77	500								
	II			139	21	17	10	0.83	550								
	III			121		13	6	0.60	440								
Bloque de concreto pesado		B1	I	182		83	34	0.61	410	188		76	38	0.75	500		
			II	139	135	100	39	0.74	390		101						
			III	121		72	25	0.54	350	72		72	28	0.71	380		
		B2	I	178		71	35	0.49	490	173		110	55	0.76	490		
			II	120	146	71	30	0.48	420		143						
			III	88		67	32	0.45	480	98		94	41	0.65	430		
		B3	I	182		67	32	0.66	480	209		85	49	0.66	570		
			II	139	100	57	24	0.57	430		128						
			III	121		61	22	0.61	360	90		86	42	0.67	490		
		B4	I	177		46	26	0.65	550								
			II	142	71	47	24	0.65	500								
			III	114		44	19	0.62	430								
Tabicón	10 x 14 x 24	TC1	I	108	31	23	16	0.74	680	81		43	28	0.65	640		
			II	90		22	14	0.69	660		65						
			III	58		18	8	0.59	460	46		40	24	0.61	590		
		TC2	I	178		36	18	0.48	500	81		73	33	0.59	450		
			II	119	76	49	22	0.64	450		123						
			III	88		53	22	0.7	410	46		52	27	0.42	510		
		TC3	I	108		53	25	0.9	480	92		43	22	0.68	520		
			II	90	59	57	26	0.96	460		63						
			III	58		48	20	0.81	420	52		35	22	0.55	630		
		TC4	I	178		16	10	0.45	630								
			II	119	36	20	9	0.54	480								
			III	88		21	11	0.57	530								
		TC5	I	163		22	10	0.46	460	92		28	20	0.5	700		
			II	94	48	221	10	0.44	450		56						
			III	93		18		0.37		52		24	19	0.43	770		
Sílico - calcáreo	7x12x24	S	I	163		129	35	0.64	267	159		138	54	0.78	390		
			II	94	201	120	32	0.59	269		177						
			III	93		135	47	0.63	345	42		125	37	0.7	290		

En la tabla 2.6, se hace una comparación entre los módulos obtenidos a partir de la medición de las deformaciones sobre la altura total de los especímenes con respecto a los obtenidos con una instrumentación en la parte central de pilas. El resultado es el prácticamente el mismo al que se había reportado en Meli y Reyes (1971).

En las figuras 2.14 y 2.15, se ilustran finalmente las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de realizar mediciones en la parte central de los especímenes; como se observa estas curvas sólo fueron desarrolladas hasta el esfuerzo máximo; sin embargo, son de gran utilidad en conjunto con los resultados de la tabla 2.5 para comparar los resultados obtenidos en el capítulo 4.

**Tabla 2.6. Ensayes de pilas a compresión
Resultados de la serie adicional para comparar los sistemas de medición
(Tomada de Meli y Hernández (1971))**

Pieza	Mortero	fp	fm	fm/fp	Micrómetros exteriores		Micrómetros interiores		E ₂ /E ₁
					E ₁	E ₁ /f _m	E ₂	E ₂ /f _m	
Tabique rojo recocido	I	58	26	0.45	6	210	8	290	1.4
			26	0.45	6	230	8	320	1.4
			24	0.42	7	290			
	III		18	0.32	6	320	7	400	1.3
			26	0.45	6	250	9		1.4
			24	0.42	6	250			
Tabique extruido	I	295	109	0.37	32	300	51	470	1.6
			100	0.34	27	270	41	410	1.5
	III		79	0.27	23	290	30	380	1.3
			74	0.25	28	380	34	470	1.2
			85	0.29	22	260	32	370	1.4
Bloque de concreto pesado	I	109	87	0.8	29	330	46	520	1.6
			80	0.74	27	340	47	580	1.7
	III		76	0.7	19	250	38	500	2
			76	0.7	19	250	40	520	2.1
			69	0.63	16	240	25	360	1.5
Tabicón	I	33	23	0.71	10	450	18	790	1.8
			20	0.61	9	460	12	590	1.3
			22	0.69	8	360	15	690	1.9
	III		17	0.53	9	520	16	920	1.8
			19	0.57	9	480	15	780	1.7
			20	0.62	10	490	15	750	1.5

fp = Resistencia media de la pieza (kg/cm²).

fm = Resistencia promedio de la pila (kg/cm²).

E₁ = Módulo de elasticidad promedio de los micrómetros exteriores (ton/cm²).

E₂ = Módulo de elasticidad promedio de los micrómetros interiores (ton/cm²).

Mortero I = 1:0:3 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Mortero II = 1:1/2:4/1/2 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Mortero III = 1:1:6 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

Mortero I = 1:0:3 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)
 Mortero III = 1:1:6 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

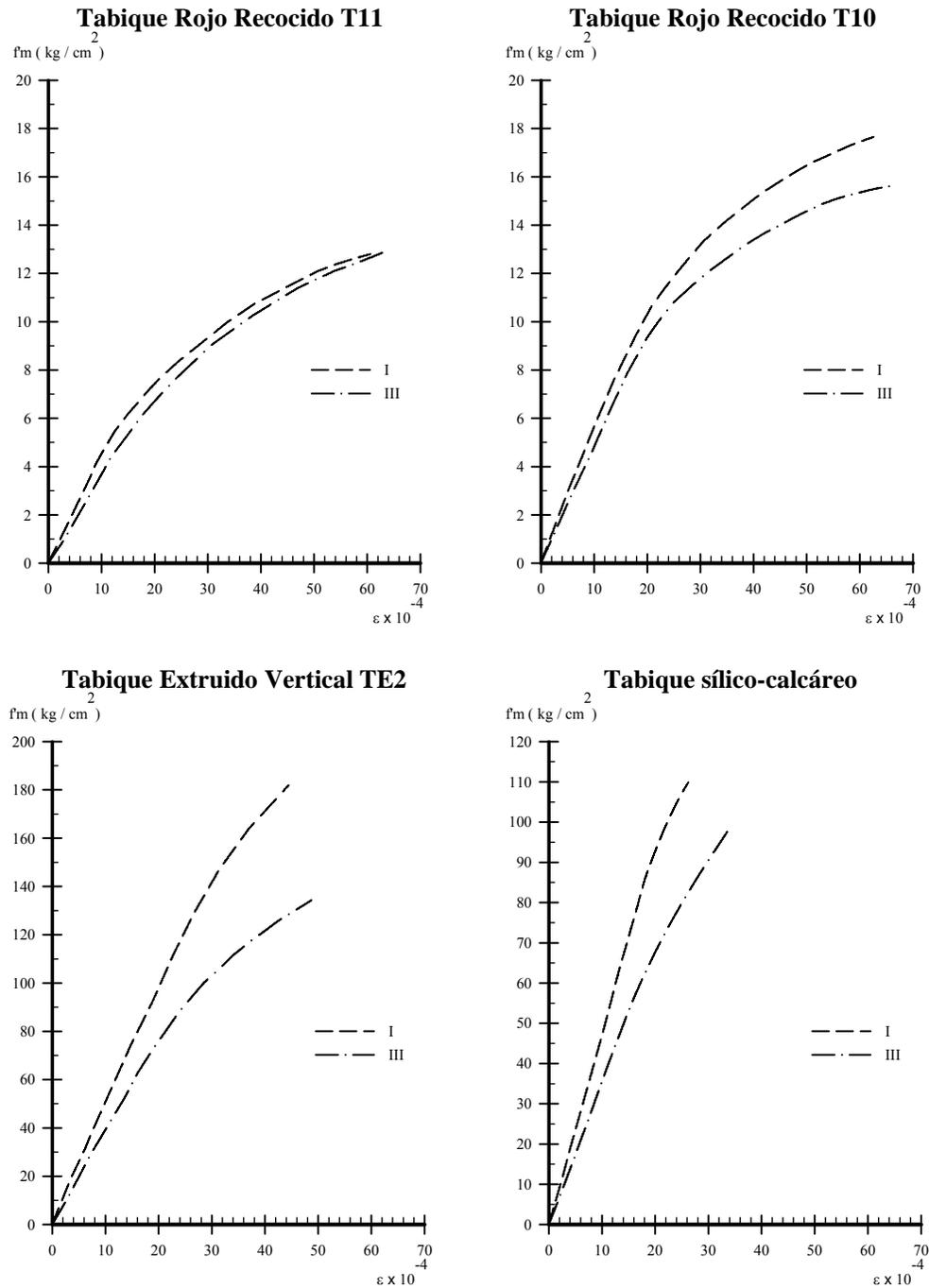


Figura 2.14. Curvas esfuerzo-deformación para piezas de arcilla (Tomada de Meli y Hernández (1971))

Mortero I = 1:0:3 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)
 Mortero III = 1:1:6 (Cemento: Cal hidráulica: Arena)

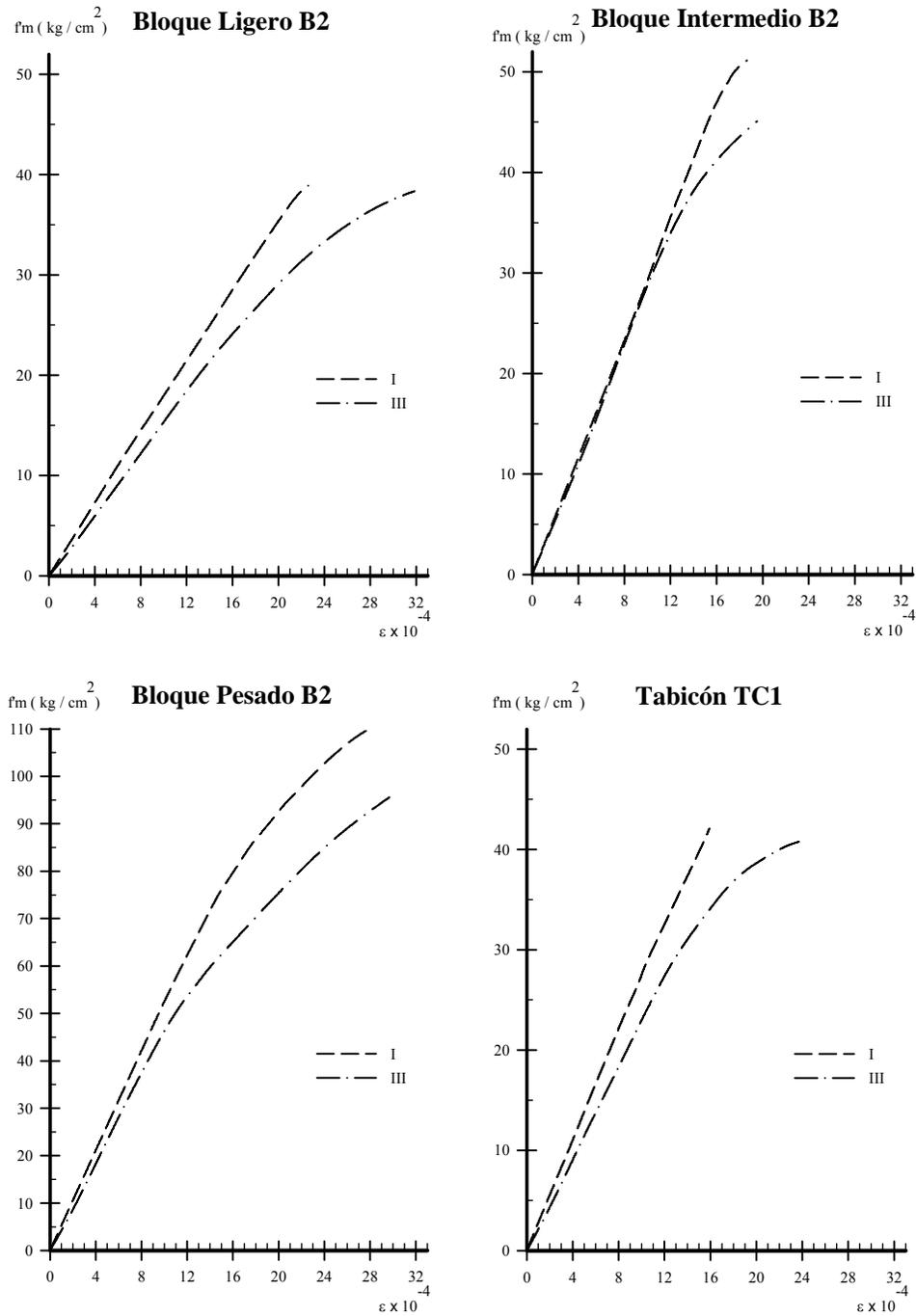


Figura 2.15. Curvas esfuerzo-deformación para piezas de cemento (Tomada de Meli y Hernández (1971))

2.4.3 Priestley y Elder (1982)

Como se mencionó anteriormente, este estudio fue realizado en Nueva Zelanda, aunque que su objetivo principal se centra en estudiar la ductilidad sobre muros esbeltos sujetos a cortante, los autores tuvieron que estudiar el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación, tanto en su rama ascendente como descendente para tener un mejor conocimiento acerca de las ductilidades los muros en estudio. En lo que respecta a la curva esfuerzo-deformación, las variables estudiadas fueron:

- a) El espesor de las piezas de mampostería.
- b) La velocidad de carga.
- c) La influencia del refuerzo vertical.
- d) El uso de placas de confinamiento en las juntas horizontales y verticales del mortero.

Se construyeron especímenes de cinco hiladas ($h/t = 5$) por una misma persona, en las que se alternó una pieza entera y dos mitades de piezas, el tipo de pieza empleada fue un bloque de concreto ($f'_p = 14$ MPa). Las piezas huecas fueron pegadas con un mortero de resistencia nominal mínima de 12.5 MPa, después se llenaron las celdas de los huecos con un mortero de relleno de una resistencia nominal mínima de $f'_c = 17.5$ MPa. Se construyeron dos tipos de prismas, unos con piezas de un espesor de 190 mm (Serie 1) y otros con un espesor de piezas de 140 mm (Serie 2), como se muestra en la figura 2.16. Además, a los prismas de la serie 2 se les incluyó refuerzo vertical y placas de confinamiento en las juntas de mortero (figura 2.16 y figura 2.17).

Durante la construcción se tomó una muestra de un cilindro de 200 mm x 100 mm de diámetro, en tres momentos diferentes para verificar la resistencia del mortero.

El mortero de relleno fue fabricado y llevado al lugar por una empresa especializada, este fue colocado de manera simple en los huecos y además se vibró sobre las celdas de los prismas. Para verificar la resistencia del mortero de relleno se tomaron directamente muestras de cilindros de 200 mm x 100 mm de diámetro del camión que contenía el mortero.

Las placas de confinamiento sobre las juntas de mortero fueron colocadas durante la etapa de la construcción de los prismas.

Los prismas fueron curados a la intemperie, para ello se cubrió el extremo superior con tela de arpillera y plástico, y se roció con agua diariamente a los especímenes durante la primer semana.

Los especímenes fueron ensayados con dos velocidades de deformación diferente, una lenta ($0.0005 \text{ \%}\epsilon/\text{s}$) y una rápida ($0.6 \text{ \%}\epsilon/\text{s}$).

En la tabla 2.7, se reportan las resistencias de los materiales empleados, y en la tabla 2.8, se presentan los detalles de los prismas ensayados.

**Tabla 2.7. Propiedades de los materiales empleados en los prismas
(Tomada de Priestley y Elder (1982))**

Material		Serie 1	Serie 2
Bloque	f_c (MPa)	38.2	38.2
Mortero	f_c (MPa)	11.4	8.4
Grout	f_c (MPa)	27.8	36.6
Refuerzo D20	f_y (MPa)	-	300
	E_s (MPa)	-	195
Acero inoxidable	f_y^* (MPa)	-	335
Placa de confinamiento	E_s (GPa)	-	159

* Valor correspondiente cuando la deformación es 1%.

**Tabla 2.8. Detalles de los prismas
(Tomada de Priestley y Elder (1982))**

Espécimen	Ancho del bloque (mm)	Placas de confinamiento (3.1 mm Acero Inoxidable 304)	Refuerzo 4D20	Velocidad de deformación (% ϵ /s)	Carga Máxima (kN)
S1-1	190	No	No	0.0005	1,999
S1-2	190			0.0005	1,925
S1-3	190			0.0005	2,005
S1-4	190			0.6	2,310
S1-5	190			0.6	2,400
S1-6	190			0.6	2,290
S2-1	140	No	No	0.5	1,840
S2-2	140	Si	No	0.5	1,900
S2-3	140	Si	No	0.5	1,765
S2-4	140	No	Si	0.0005	1,390*
S2-5	140	Si	Si	0.0005	1,754*
S2-6	140	No	No	0.5	1,800
S2-7	140	Si	No	0.0005	1,633
S2-8	140	Si	No	0.5	1,251*
S2-9	140	No	Si	0.5	2,178
S2-10	140	Si	Si	0.5	2,350
S2-11	140	No	No	0.0005	1,470
S2-12	140	Si	No	0.5	1,900
S2-13	140	Si	No	0.0005	1,652
S2-14	140	No	Si	0.0005	1,908
S2-15	140	Si	Si	0.0005	2,085

* Prismas con huecos severos en el Grout, resultados descartados.

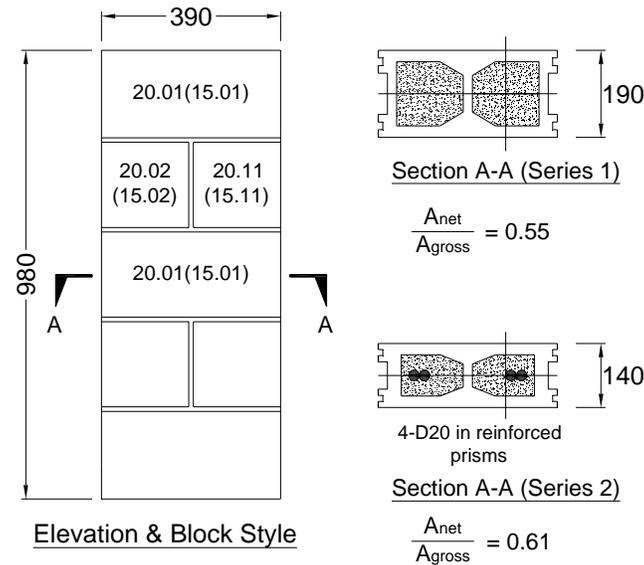


Figura 2.16. Dimensiones de los prismas (mm)
(Tomada de Priestley y Elder (1982))

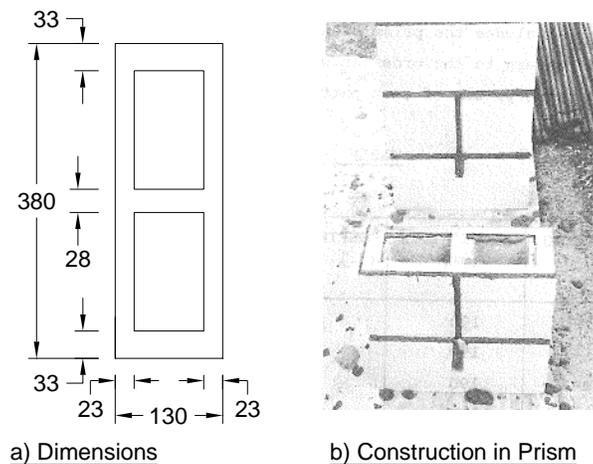


Figura 2.17. Placas de confinamiento de las juntas de mortero (mm)
(Tomada de Priestley y Elder (1982))

Los prismas fueron ensayados en la máquina universal; antes de ser ensayados estos fueron cabeceados con yeso en la parte superior e inferior. Se utilizaron dos métodos de medición uno por medio de la servoválvula de la máquina universal y otro empleando un sistema de medición externo a través de potenciómetros colocados en la parte central del espécimen en 3/5 partes de la altura del espécimen.

En la tabla 2.9, se muestran los resultados de los ensayos realizados en las pilas.

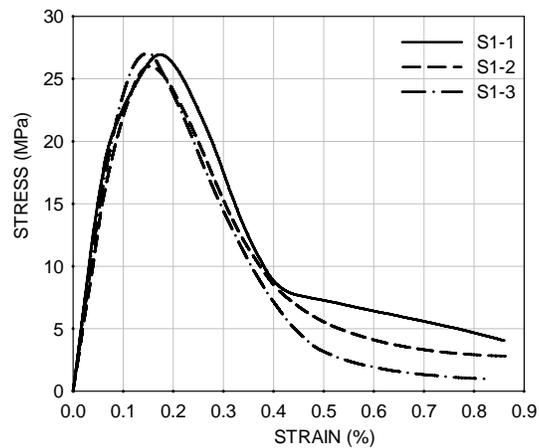
**Tabla 2.9 Resumen de los resultados de las pruebas de los prismas
(Tomada de Priestley y Elder (1982))**

Especimen	Detalles				f_m (MPa)	ϵ_0	$f_{0.003} / f_m$	$f_{0.006} / f_m$	E_m (GPa)
	Ancho del bloque (mm)	Confinamiento	Refuerzo vertical	Velocidad de carga					
S1-1	190	No		Lenta	27.0	0.00165	0.63	0.24	32.7
S1-2					26.0	0.00150	0.59	0.16	26.4
S1-3					27.1	0.00145	0.54	0.07	28.6
S1-4	190			Rápida	31.2	0.00150	0.63	0.11	30.5
S1-5					32.4	0.00150	0.59	0.11	30.5
S1-6					30.9	0.00155	0.71	0.19	30.5
S2-11	140	No		Lenta	26.9	0.00155	0.34	0.05	28.4
S2-1	140			Rápida	33.7	0.00190	0.74	0.08	33.3
S2-6					33.0	0.00165	0.68	0.14	27.4
S2-7	140	Si	No	Lenta	29.9	0.00180	0.89	0.58	28.8
S2-13					30.3	0.00170	0.91	0.75	31.8
S2-2	140			Rápida	34.8	0.00185	0.95	0.51	32.3
S2-3					32.2	0.00185	0.92	0.53	27.0
S2-12					34.8	0.00225	0.93	0.45	31.5
S2-14	140			No	Si	Lenta	28.3	0.00185	0.52
S2-9	140	Rápida	33.2			0.00145	0.55	0.19	32.6
S2-15	140	Si		Lenta	31.5	0.00185	0.90	0.50	33.9
S2-10	140			Rápida	36.4	0.00205	0.95	0.65	26.1

Debido a que en 2/3 partes de las curvas esfuerzo-deformación registradas experimentalmente, no se obtuvieron curvas confiables durante toda la prueba, se aplicó un método de corrección para poder obtener la curva esfuerzo-deformación completa. Este método consiste en corregir la curva obtenida por la máquina universal a partir de la curva (rama ascendente) de los deformímetros centrales. El método de corrección analítica se explica en el capítulo 3.

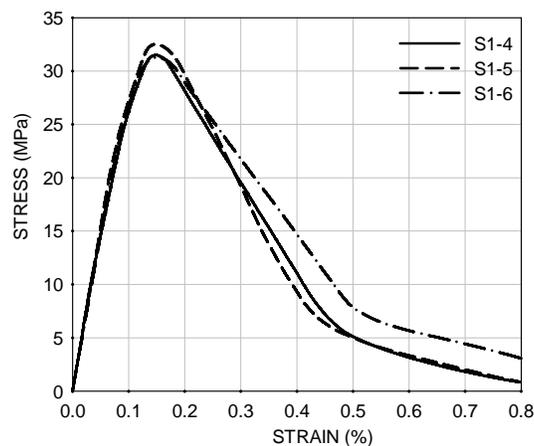
2.4.3.1 Curvas esfuerzo-deformación para los especímenes de la serie 1

Para los especímenes ensayados a una velocidad lenta de 0.0005 % ϵ /s, se puede observar como existe poca variación de la curva esfuerzo-deformación entre los especímenes ensayados, excepto en la parte final de la curva descendente a partir del punto donde las deformaciones son mayores a 0.4%. De la tabla de resultados se obtiene una resistencia promedio es de 26.7 MPa y un módulo de elasticidad promedio de 29.23 GPa. En la figura 2.18, se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas cuando la velocidad de deformación aplicada es lenta.



**Figura 2.18. Curva esfuerzo-deformación para los prismas de 190 mm de la serie 1
(0.0005 % ϵ /s)
(Tomada de Priestley y Elder (1982))**

En lo que respecta para los especímenes ensayados a una velocidad rápida de 0.6 % ϵ /s (figura 2.19), se observa que también existe poca variación en la curva esfuerzo-deformación para la rama ascendente, lo mismo se podría decir de la rama descendente. Igualmente de la tabla de resultados la resistencia promedio es de 31.5 MPa y el módulo de elasticidad es de 30.5 GPa.



**Figura 2.19. Curva esfuerzo-deformación para los prismas de 190 mm de la serie 1
(0.6 % ϵ /s)
(Tomada de Priestley y Elder (1982))**

Haciendo una comparación entre los especímenes ensayados a baja y alta velocidad de carga, se observa que existe un incremento en la resistencia del orden del 20.5%, se aprecia como la velocidad de carga no afecta la deformación promedio asociada al esfuerzo máximo la cual fue de 0.152 %. El comportamiento de la curva esfuerzo-deformación de la rama descendente es en los dos casos es pronunciada lo que indica un modo de falla frágil. El módulo de elasticidad promedio en un esfuerzo de 10 MPa es de 30.6 GPa. En la figura 2.20, se ilustra la comparación del efecto de la variación de la velocidad de deformación aplicada sobre los especímenes.

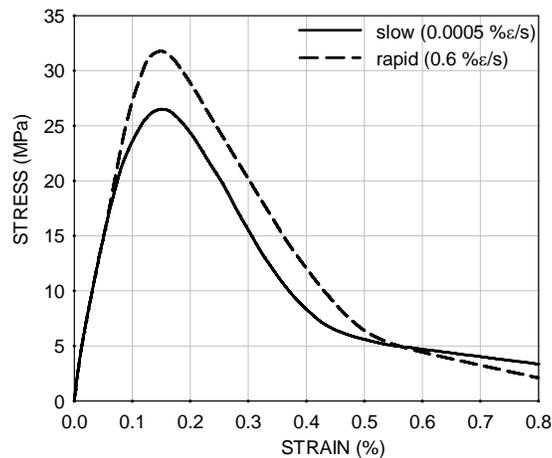


Figura 2.20. Comparación entre las curvas promedio de la serie 1, para baja y alta velocidad de carga (Tomada de Priestley y Elder (1982))

2.4.3.2 Curvas esfuerzo-deformación para los especímenes de la serie 2

a) Especímenes con mortero de relleno, sin refuerzo vertical y sin confinamiento en las juntas de mortero

En la figura 2.21, se comparan las velocidades de carga lentas y rápidas para los especímenes de la serie 2, el incremento en la resistencia fue del 24% al ensayar los especímenes a una velocidad alta de 0.6 %ε/s, el módulo de elasticidad es muy parecido al correspondiente para los especímenes de la serie 1. La caída de la rama descendente de las curvas esfuerzo-deformación es muy parecida para los dos tipos de velocidad. Se observa que en este caso la velocidad de carga si afecta la deformación en la cual ocurre el esfuerzo máximo, para la velocidad lenta tal deformación fue de 0.155% y no varía con las de los especímenes de la serie 1 ensayados a una velocidad de carga lenta; en cambio, la deformación promedio en la cual ocurre la deformación máxima para los especímenes de rápida velocidad de carga en este caso es de 0.1775%.

Velocidad lenta (0.0005 %ε/s): La resistencia del único espécimen ensayado es de 26.9 MPa y el módulo de elasticidad es de 28.4GPa.

Velocidad rápida (0.6 %ε/s): La resistencia promedio de los dos especímenes ensayados es de 33.35 MPa y el módulo de elasticidad promedio de 30.35 GPa. La curva esfuerzo-deformación es muy parecida para los dos especímenes sobre todo en la rama ascendente y no tanto en la parte final de la rama descendente.

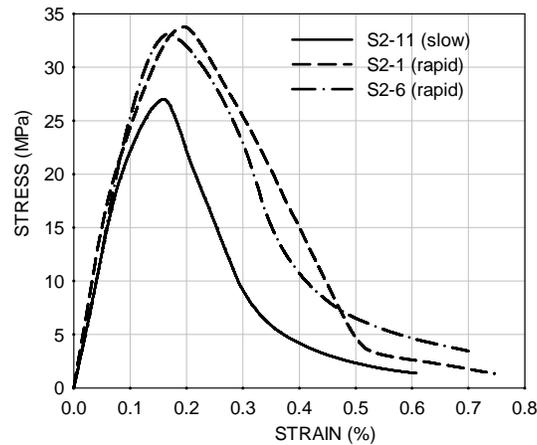


Figura 2.21. Curvas esfuerzo-deformación para los prismas simples de 140 mm de la serie 2 (Tomada de Priestley y Elder (1982))

b) Especímenes con mortero de relleno, con refuerzo vertical y sin confinamiento en las juntas de mortero

Al ser comparadas estas curvas (figura 2.22) con las de la figura 2.21, se revela que no existe una influencia del refuerzo vertical, el espécimen S2-9 por un lado presenta un esfuerzo máximo un poco menor que el de los especímenes S2-1 y S2-6, así como un inicio en la curva descendente más pronunciado. Por otro lado lo anterior ocurre contrariamente al comparar el espécimen S2-14 con el S2-11. Resistencias similares fueron obtenidas con los especímenes que no tenían refuerzo cuando la carga que soporta el refuerzo vertical fue sustraída. El pandeo de la varillas de refuerzo no causó un incremento significativo en la fragilidad de los especímenes.

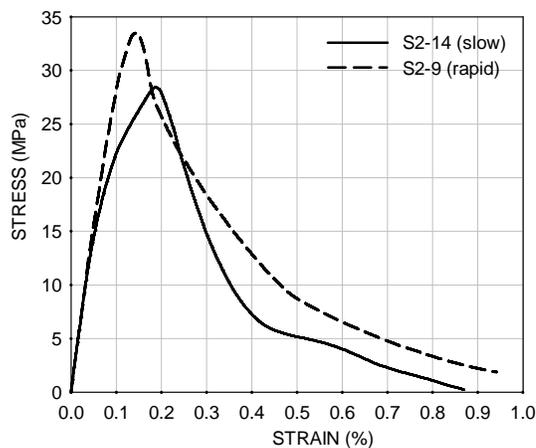


Figura 2.22. Curvas esfuerzo-deformación para los prismas no confinados de 140 mm de la serie 2 con refuerzo vertical (Tomada de Priestley y Elder (1982))

c) **Especímenes con mortero de relleno, sin refuerzo vertical y confinando las juntas del mortero**

Para este caso se comparan estas curvas (figura 2.23) con las de la figura 2.21 encontramos que existe una modificación substancial en los que respecta a la curva esfuerzo-deformación inducida por las placas de confinamiento en las juntas del mortero, la resistencia máxima se incrementa sobretodo en los especímenes sujetos a una velocidad de carga lenta. La curva de la rama descendente es por mucho más plana, lo que nos indica que podemos esperar altas curvaturas de ductilidad.

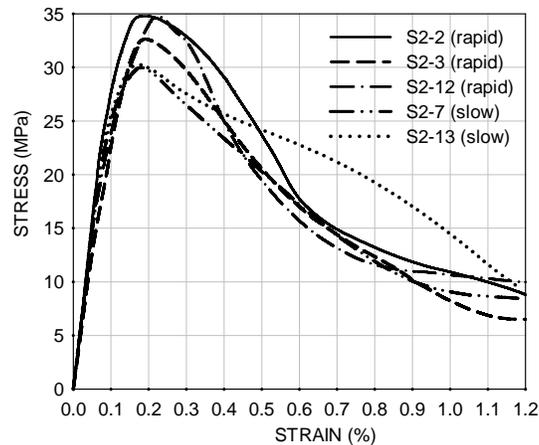


Figura 2.23. Curvas esfuerzo-deformación para los prismas de 140 mm solamente confinados de la serie 2 (Tomada de Priestley y Elder (1982))

d) **Especímenes con mortero de relleno, con refuerzo vertical y confinando las juntas del mortero**

Comparando estas curvas (figura 2.24) con las de la figura 2.21 se observa que la resistencia se incrementa y la curva de la rama descendente tiende a ser menos pronunciada.

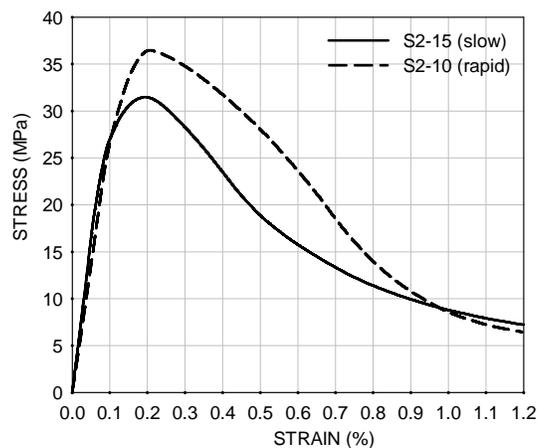


Figura 2.24. Curvas esfuerzo-deformación para los prismas confinados de la serie 2 con refuerzo vertical (Tomada de Priestley y Elder (1982))

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Una vez que se construyeron los muretes, estos permanecieron alrededor de 21 días en el lugar de su construcción sin ser movidos y sin ser sujetos a ningún proceso de curado. Se decidió cabecear los muretes después de que cumplieron 21 días para minimizar el riesgo de que las juntas perdieran su adherencia con las piezas por la maniobra del proceso. El objeto del cabeceo es tener una distribución de la carga axial razonablemente uniforme sobre el área de contacto de las placas con el espécimen; para el cabeceo se utilizó azufre.

A partir de los 28 días desde la construcción de los muretes como lo marcan las NTCM-2004 del RCDF, los especímenes fueron transportados, colocados e instrumentados sobre la máquina universal para finalmente ser ensayados.

Para los ensayos, los muretes fueron alineados de la mejor manera posible con el eje de la celda de carga para minimizar la presencia de excentricidades, esta actividad se realizó durante el proceso de precarga de los especímenes para eliminar lo mejor posible el efecto del reacondo del cabeceo y de las juntas en la parte central, así como para verificar que las lecturas de los transductores de desplazamiento fueran iguales en signo y muy similares en cuanto magnitud.

Las velocidades de deformación que se emplearon para ensayar los especímenes fueron una velocidad lenta de 0.0016 mm/seg y una velocidad rápida de 0.5333 mm/seg de manera similar a los estudios de Priestley y Elder (1982). Con la velocidad rápida se consideran los efectos ocasionados por la acción sísmica sobre las mamposterías en estudio.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MURETES DE MAMPOSTERÍA

3.2.1 Características de los muretes de mampostería a ensayar

Las NTCM-2004 del RCDF, recomiendan como mínimo construir pilas formadas con tres piezas sobrepuestas con una relación de aspecto igual a cuatro, por las siguientes ventajas experimentales Meli y Reyes (1971):

- a) Su modo de falla a la compresión axial corresponde razonablemente a la de un muro de mampostería a escala real.
- b) Las resistencias máximas obtenidas no se ven afectadas por los efectos de restricción de las cabezas de la máquina universal de ensayos durante la aplicación de la carga axial sobre el espécimen.

- c) Las pilas son más fáciles de construir, transportar y ensayar.

Sin embargo, en diferentes estudios se han utilizado especímenes combinando piezas enteras y mitades de las mismas en los cuales no se han encontrado diferencias significativas respecto a los resultados obtenidos de pilas (Priestley y Elder 1982, Mayes, 1975, Juárez 2008, Salinas 2009).

En este estudio se construyeron muretes con una relación de aspecto cercana a cinco y con un largo correspondiente a una pieza y media mas el espesor de la junta de albañilería vertical, como las piezas se pegaron a soga, el ancho (b) del espécimen correspondía al ancho de la pieza (t). La relación de aspecto cercana a cinco, se escogió así para tener congruencia con los especímenes empleados por Priestley y Elder (1982) al aplicar el método de corrección analítico. El pegado de las piezas de los muretes representa la configuración de un muro con piezas pegadas en cuatrapeado. Se consideró que el empleo de muretes es más representativo de un muro construido en la práctica, pues las hiladas de estos no se apilan y además contienen juntas verticales.

La junta de albañilería horizontal y vertical con que se construyeron los muretes fue de 1 cm de espesor cumpliendo con los valores permitidos por las NTCM-2004 del RCDF.

Se manejaron tres tipos de piezas usadas comúnmente en elementos estructurales de mampostería que cumplen con las dimensiones mínimas reglamentarias según la NMX-C-404-ONNCE (2005), las dimensiones de las piezas se verificaron como lo indica la NMX-C-038-ONNCE (2004), en la figura 3.1 se muestran los tres tipos de piezas consideradas en este estudio.



Figura 3.1. Tipos de piezas

En la tabla 3.1 se muestran las dimensiones nominales y las dimensiones promedio de las piezas utilizadas durante el proyecto.

Tabla 3.1. Dimensiones de las piezas

Tipo de pieza	Dimensiones nominales mínimas (cm)	Dimensiones promedio (cm)
LRR ¹	10.00 x 5.00 x 19.00	11.75 x 5.50 x 23.50
Tabicón	10.00 x 6.00 x 24.00	13.00 x 7.00 x 24.00
TEV2H	Aplicar NMX-C-038-ONNCE (2004)	12.00 x 6.00 x 24.00

¹ Las piezas de ladrillo rojo recocido fueron seleccionadas de manera que la forma prismática y el tamaño coincidieran lo mejor posible con la finalidad de no tener problemas principalmente en la instrumentación de los deformímetros colocados en la parte central de los especímenes. Las otras dos piezas nos presentaron una irregularidad tan marcada en cuanto a su forma y tamaño.

En la tabla 3.2 se muestran las dimensiones de los muretes de mampostería a ensayar, mientras que sus características geométricas se esquematizan en la figura 3.2.

Tabla 3.2 Dimensiones de los muretes de mampostería

Murete	Dimensiones (cm)	Relación h/t
Ladrillo rojo recocido	11.75 x 36.25 x 57.5	4.894
Tabique extruido vertical de dos huecos	12.00 x 37.00 x 55.0	4.583
Tabicón	13.00 x 37.00 x 63.0	4.846

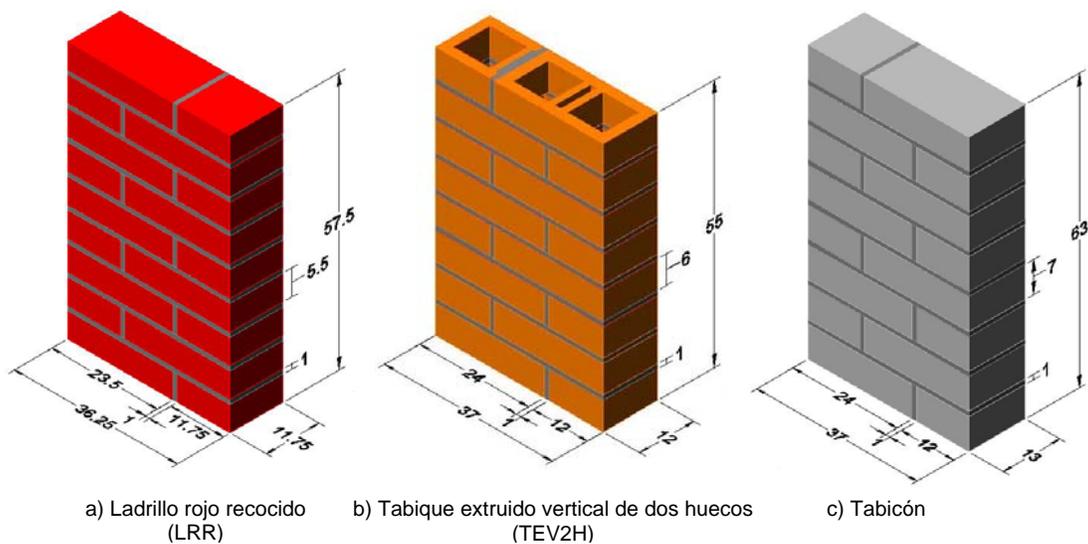


Figura 3.2. Dimensiones de los muretes de mampostería

3.2.2 Proceso de construcción

Los muretes se elaboraron por una misma persona (un maestro albañil ampliamente calificado), sobre una superficie plana previamente nivelada y cuidando la verticalidad de tres costados de los muretes.

El mortero que se empleó para pegar las piezas de mampostería fue un mortero Tipo I acorde al establecido por las NTCM-2004 del RCDF. El proporcionamiento en volumen que se empleó para construir los muretes de mampostería se indica en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Proporcionamiento del volumen empleado para obtener un mortero Tipo I

Mortero Tipo	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena ¹
I	1	0	0	3 veces el volumen del cementante

¹ El volumen de arena se midió en estado suelto.

La fabricación del mortero fue manual realizando el mezclado del mortero cemento-arena-agua con pala, la arena empleada se encontraba libre de materia orgánica así como de partículas ajenas a la misma. Esta se cribó por la malla número 4, eliminando de esta manera los agregados gruesos que esta pudiese tener, como cementante se utilizó un cemento tipo Pórtland. Para obtener un mortero lo más homogéneo posible, primero se mezclaron la arena y el cemento, después se agregó una cantidad considerable de agua a la mezcla sólida arena-cemento para volverla a mezclar, finalmente se fue agregando el agua necesaria y se repitió el proceso de mezclado hasta obtener un mortero de consistencia fácilmente trabajable como lo indican las NTCM-2004 del RCDF. Para evitar lo menos posible la pérdida de agua en el mortero, este se preparó sobre una superficie metálica plana y limpia. Cuando fue requerido, el mortero fue remezclado agregando nuevamente a la mezcla el agua necesaria, esto se debe al efecto de pérdida de agua por la evaporación del agua en el mortero.

Las piezas de arcilla fueron saturadas con agua antes de ser colocadas, las piezas con base en cemento se colocaron en el estado de humedad en que se encontraban. Para cuidar que las mitades de piezas empleadas fueran realmente mitades prismáticas, estas fueron partidas con una cortadora mecánica que emplea un disco de dientes de diamante.

Los muretes se construyeron sobre los bordes (lado largo) de una mesa rectangular, para obtener una forma prismática de los muretes, primero se niveló lo mejor posible la dirección largo y ancho de la superficie plana de la mesa, además se cuidó la verticalidad de tres de los lados de los muretes (figura 3.3). En la superficie plana de la mesa se desplantaron los muretes, en los bordes se marcó el largo correspondiente de cada espécimen dejando una separación adecuada entre especímenes para efectos de maniobra.



Figura 3.3. Construcción de los muretes

Para cuidar la verticalidad de uno de los costados de los muretes, se requirió tender hilos paralelos al ras de uno de los lados largos del espécimen, los hilos se sujetaban sobre puntales de madera previamente nivelados, paralelos al costado de referencia de los especímenes y formando un ángulo de 90° con la base de desplante de los muretes. Los puntales tenían la rigidez suficiente para que estos no se movieran con el tensado de los hilos o con algún movimiento brusco.

Con un hilo fijo se definía la altura del espécimen y sobre este se marcaba la ubicación correspondiente del largo del espécimen a dicha altura, estas marcas debían corresponder con las otras marcas colocadas en la base, trazando una recta a 90° a partir de la base al hilo fijo o viceversa. La verticalidad de los otros dos costados del espécimen a lo largo del ancho del mismo se cuidaba visualmente durante el proceso de construcción, observando las marcas que iban desde el hilo fijo a las marcas en la base de desplante. Además se empleaban hilos

adicionales los cuales se colocaban conforme se iban necesitando para delimitar las hiladas del espécimen incluyendo el espesor de la junta horizontal del mortero, estos hilos controlaban la verticalidad del lado largo del espécimen al ras de la base de desplante.

Como se describió anteriormente, los hilos utilizados en la fabricación de los muretes tienen un papel muy importante, pues con estos se controlaba el espesor de la junta horizontal y vertical, así como las dimensiones largo y alto del espécimen. También es importante mencionar que con un espécimen lo más prismático posible, se facilita el cabeceo del mismo, la colocación del dispositivo de medición en la parte central del murete y lo más importante se minimizan fuentes de excentricidad. En la figura 3.4, se muestra el resultado final de utilizar los hilos.



Figura 3.4. Resultado final de los muretes empleando hilos para cuidar la verticalidad de 3 de los costados

3.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MURETES

Antes de la construcción de los especímenes se realizaron algunas pruebas sobre las piezas de mampostería y el mortero con el objetivo de conocer algunas de sus propiedades mecánicas. Dichas propiedades se utilizan para cuantificar la calidad de los materiales empleados en el diseño y construcción de muros de mampostería. Estos materiales deben de cumplir con los límites mínimos de calidad que establecen las NTCM-2004 del RCDF y la NMX-C-404.

3.3.1 Piezas de mampostería

Las piezas empleadas en la fabricación de los especímenes provienen de un solo fabricante, el cual fue diferente para cada tipo de pieza considerada. Para la selección y muestreo de las piezas de mampostería ensayadas no se consideró el efecto de la variabilidad de los lotes de producción por parte de las piezas.

3.3.2 Peso Volumétrico

Para cada tipo de pieza de mampostería considerada, el peso volumétrico se obtuvo del promedio de cinco piezas previamente secadas en un horno (figura 3.5).



Figura 3.5. Determinación del peso volumétrico de las piezas

El peso volumétrico de cada pieza se estimó conforme a la ecuación (3.1)

$$\gamma = \frac{W_s}{V} \quad (3.1)$$

donde W_s es el peso seco de la pieza y V es el volumen de la pieza.

Los resultados obtenidos durante el proceso de la prueba se muestran en la tabla 3.4:

Tabla 3.4 Pesos volumétricos de las piezas de mampostería

Tipo de pieza	Dimensiones (cm)	Volumen (m ³)	Espécimen	W_s (kg)	γ (kg/m ³)	$\gamma_{promedio}$ (kg/m ³)
LRR	11.75 x 5.5 x 23.5	1.51869 x 10 ⁻³	1	2.1760	1,432.82	1,435
			2	2.1700	1,428.87	
			3	2.2215	1,462.78	
			4	2.2180	1,460.47	
			5	2.1105	1,389.69	
TEV2H	12 x 6 x 24	0.8928 x 10 ⁻³	1	1.4735	1,650.43	1,656
			2	1.4800	1,657.71	
			3	1.4695	1,645.95	
			4	1.4820	1,659.95	
			5	1.4890	1,667.79	
Tabicón	13 x 7 x 24	2.184 x 10 ⁻³	1	2.437	1,115.84	1,104
			2	2.287	1,047.16	
			3	2.283	1,045.33	
			4	2.513	1,150.64	
			5	2.536	1,161.17	

LRR = Ladrillo rojo recocido.

TEV2H = Tabique extruido vertical de dos huecos.

3.3.3 Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua, según NMX-C-037-ONNCCE (2005)

Estas propiedades físicas se obtuvieron del promedio de cinco piezas para determinar la absorción total de agua en 24 horas y de un promedio de tres piezas para determinar la absorción inicial de agua, esto para cada tipo de pieza considerada en el estudio (figura 3.6 y figura 3.7).



Figura 3.6. Prueba de absorción inicial en 10 minutos



Figura 3.7. Prueba de absorción total a las 24 horas

La absorción total en 24 horas para cada pieza se estimó conforme a la ecuación (3.2).

- Referido al volumen aparente del espécimen

$$A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_{SSS} - P_a} \times 1000 \quad (3.2 \text{ a})$$

- Referido en porcentaje

$$Ab = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \times 100 \quad (3.2 \text{ b})$$

donde M_S es la masa seca de la pieza en kilogramos, M_{SSS} es la masa de la pieza saturada en agua y superficialmente seca con un trapo húmedo en kilogramos y P_a es la masa de la pieza sumergida totalmente en un recipiente con agua en kilogramos.

La absorción inicial de cada pieza se estimó conforme a la ecuación (3.3).

$$Cb = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(P_1 - P_0)}{S\sqrt{10}} \quad (3.3)$$

donde M es el peso del agua absorbido por la pieza durante el ensaye en gramos, S es la superficie en centímetros cuadrados de la cara de la pieza sumergida de manera tal que quede 5 mm por debajo del nivel del agua, y t es el tiempo de inmersión en minutos.

Los resultados obtenidos durante el proceso de las pruebas se muestran en la tabla 3.5 y en la tabla 3.6:

Tabla 3.5 Absorción total durante 24 horas

Tipo de pieza	Dimensiones (cm)	Espécimen	M_s (kg)	M_{SSS} (kg)	P_a (kg)	A (dm^3/m^3)	A (%)	A (%)
LRR	11.75 x 5.5 x 23.5	1	2.1760	2.6270	1.2330	323.53	20.73	20.63
		2	2.1700	2.6390	1.2550	388.87	21.61	
		3	2.2215	2.6770	1.2720	324.20	20.50	
		4	2.2180	2.6400	1.2600	305.80	19.03	
		5	2.1105	2.5600	1.2160	334.45	21.30	
TEV2H	12 x 6 x 24	1	1.4735	1.7510	0.9250	335.96	18.83	18.36
		2	1.4800	1.7490	0.9290	328.05	18.18	
		3	1.4695	1.7390	0.9220	329.87	18.34	
		4	1.4820	1.7385	0.9280	316.47	17.31	
		5	1.4890	1.7740	0.9330	338.88	19.14	
Tabicón	13 x 7 x 24	1	2.4370	3.1430	1.0765	341.64	28.97	27.91
		2	2.2870	2.9340	0.9445	325.21	28.29	
		3	2.2830	2.8625	0.9175	297.94	25.38	
		4	2.5130	2.2440	1.1350	346.61	29.09	
		5	2.5360	2.2415	1.1190	332.39	27.82	

Tabla 3.6 Absorción inicial durante 10 minutos

Tipo de pieza	Dimensiones (cm)	Espécimen	P_0 (grs)	P_1 (grs)	M (grs)	S (cm^2)	C_b (grs/min)	C_b (grs/min)
LRR	11.75 x 5.5 x 23.5	1	2,156	2,504	348	276.13	39.85	33.86
		2	2,066	2,290	224		25.65	
		3	2,210	2,525	315		36.07	
TEV2H	12 x 6 x 24	1	1,501	1,543	42	148.8	19.05	15.94
		2	1,407	1,525	38		17.23	
		3	1,507	1,549	42		11.53	
Tabicón	13 x 7 x 24	1	2,502	2,690	188	312	8.93	8.64
		2	2,530	2,700	170		8.08	
		3	1,152	1,206	55		149.5	

LRR = Ladrillo rojo recocido.

TEV2H = Tabique extruido vertical de dos huecos.

3.3.4 Resistencia a la compresión, según NMX-C-036-ONNCCE (2004) y resistencia de diseño a la compresión, según NTCM-2004 del RCDF

Para determinar la resistencia a compresión de las piezas se escogieron 10 unidades para cada tipo de pieza, las cuales fueron ensayadas a compresión pura en la máquina universal de ensayos (figura 3.8).



Figura 3.8. Resistencia a compresión de las piezas

La resistencia a compresión pura para cada pieza se estimó conforme a la ecuación (3.4).

$$f_p = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

donde P es la carga axial máxima resistida por la pieza en kilogramos y A es el área gruesa de la sección transversal, normal a la aplicación de la carga, en centímetros cuadrados.

La resistencia de diseño a compresión para cada tipo de pieza, según las NTCM-2004 del RCDF, se estimó acorde a la ecuación (3.5).

$$f_p^* = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.50 * C_p} \quad (3.5)$$

donde f_p es la media de la resistencia a compresión pura de las piezas y C_p es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

El coeficiente de variación de las piezas no será en ningún caso:

$$C_p < \begin{cases} 0.20 \text{ Piezas provenientes de plantas mecanizadas con un control de calidad segun NMX - C - 404} \\ 0.30 \text{ Piezas provenientes de plantas mecanizadas sin un control de calidad segun NMX - C - 404} \\ 0.35 \text{ Piezas de producción artesanal.} \end{cases}$$

Los resultados obtenidos durante el proceso de la prueba se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resistencia a compresión de las piezas

Tipo de pieza	Dimensiones (cm)	Área (cm ²)	Espécimen	P (kgf)	f_p (kgf/cm ²)	\bar{f}_p (kgf/cm ²)	C_p (Calculado)	C_p (NTCM)	f_p^* (kgf/cm ²)
LRR	11.75 x 5.5 x 23.5	276	1	28,478	103.135	96	0.112	0.35	51
			2	28,802	104.309				
			3	28,743	104.092				
			4	23,449	84.920				
			5	29,789	107.881				
			6	24,517	88.790				
			7	26,813	97.104				
			8	20,222	73.234				
			9	27,630	100.065				
			10	26,968	97.665				
TEV2H	12 x 6 x 24	288	1	34,795	120.815	135	0.326	0.326	74
			2	23,761	82.505				
			3	32,770	113.786				
			4	20,612	71.568				
			5	32,699	113.538				
			6	42,102	146.188				
			7	53,193	184.698				
			8	59,981	208.267				
			9	50,294	174.632				
			10	38,596	134.014				
Tabicón	13 x 7 x 24	312	1	22,506	72.134	64	0.202	0.30	37
			2	22,717	72.810				
			3	28,126	90.147				
			4	19,397	62.169				
			5	22,340	71.602				
			6	16,714	53.571				
			7	17,005	54.503				
			8	15,505	49.696				
			9	20,393	65.362				
			10	15,327	49.125				

LRR = Ladrillo rojo recocido.

TEV2H = Tabique extruido vertical de dos huecos.

3.3.5 Mortero Tipo I

3.3.5.1 Granulometría de la arena

Para tener un buen mortero es necesario que la arena cumpla con ciertos porcentajes de agregados considerados como finos, estos valores indicativos fueron tomados de Tena (1994). Aunque solo un porcentaje no se cumplió debido a que se trataba de una arena muy triturada, ésta no se preparó para que cumpliera con tal valor indicativo (figura 3.9). Los resultados obtenidos de la granulometría se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Granulometría de la arena empleada en el mortero
Peso de la muestra cuarteada = 1,925 grs

Malla	Peso (grs)		Pasa (%)	Límite (%)	Cumple
	Retenido	Pasa			
4	0	1925	100	100	Si
8	360.5	1564.5	78.92	95-100	No
100	1291	273.5	13.80	25 máx.	Si
200	136	137.5	6.94	10 máx.	Si
Charola	126	= 0.60 %			
Perdida	11.5				



Figura 3.9. Granulometría de la arena

3.3.6 Resistencia a la compresión, según NMX-C-061 y resistencia de diseño a la compresión, según NTCM-2004 del RCDF

La resistencia del mortero se obtuvo del promedio de 3 cubos de 5 x 5 cm, se consideró adecuado este número de cubos porque en una sesión se fabricaban muretes de un solo tipo y el volumen de mortero preparado era pequeño. El llenado de los cubos, el curado y ensaye de los mismos se siguió con forme a la NMX-C-061-ONNCCE (figura 3.10).



a) Colocación del espécimen



b) Compresión del espécimen



c) Falla de los cubos de mortero

Figura 3.10. Resistencia a compresión del mortero

La resistencia a compresión pura para cada cubo se estimó conforme a la ecuación (3.6).

$$f_j = \frac{P}{S} = \frac{P}{25} \quad (3.6)$$

donde P es la carga axial máxima resistida por el cubo en kilogramos y S es el área de la sección transversal, normal a la aplicación de la carga, en centímetros cuadrados.

La resistencia de diseño a compresión del mortero utilizado se reporta únicamente para todo el conjunto de cubos ensayados y no por fecha de elaboración. Esta última no cumple con una

muestra de mínimo nueve cubos como se especifica en las NTCM-2004 del RCDF. La resistencia de diseño, según las NTCM-2004 del RCDF, se estimó acorde a la ecuación (3.7).

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{1 + 2.50 * C_j} \quad (3.7)$$

donde f_j es la media de la resistencia a compresión pura de los cubos y C_p es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de los cubos.

El coeficiente de variación de los cubos no será en ningún caso menor a 0.20.

Los resultados obtenidos después de ensayar los cubos de mortero se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resistencia a compresión del mortero

Fecha elaboración	Número muretes	Tipo pieza	Cubo	P (kgf)	f_j (kgf/cm ²)	\bar{f}_j (kgf/cm ²)	C_j (Calculado)	C_j (NTCM)	f_j^* (kgf/cm ²)
2/Sept/2008	6	Tabicón	1	6,447.14	257.886	229	0.248	0.248	141
			2	5,994.85	239.794				
			3	6,867.13	274.685				
11/Sept/2008	3	LRR	1	3,888.19	155.528				
			2	4,299.29	171.972				
			3	4,088.68	160.347				
12/Dic/2008	6	LRR	1	6,000.08	240.003				
			2	5,522.75	220.910				
			3	5,529.74	221.189				
15/Dic/2008	6	TEV2H	1	8,054.02	322.161				
			2	8,302.94	322.118				
			3	8,171.05	326.842				
13/Feb/2009	8	Tabicón	1	3,887.67	155.507				
			2	3,910.18	156.407				
			3	4,031.40	161.256				
24/Feb/2009	4	TEV2H	1	5,342.25	213.690				
			2	5,165.62	206.625				
			3	5,403.47	216.139				
25/Feb/2009	4	LRR	1	6,132.00	245.280				
			2	6,622.75	264.910				
			3	6,635.69	265.428				

LRR = Ladrillo rojo recocido.

TEV2H = Tabique extruido vertical de dos huecos.

3.3.7 Resumen de las propiedades obtenidas a partir de pruebas experimentales y comparación numérica respecto a lo que permiten las normas en cuestión

Tabla 3.10 Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco

Tipo de pieza	Experimental	NTCM-2004
	γ_{promedio} (kg/m ³)	$\gamma_{\text{mín.}}$ (kg/m ³)
Ladrillo rojo recocido	1,435	1,300
Tabique extruido	1,656	1,700
Tabicón	1,104	1,500

Tabla 3.11 Absorción total de agua y absorción inicial de agua

Tipo de pieza	Experimental		NMX-C-404		
	A (%)	Cb (grs/min)	A _{máxima} (%)	Cb _{máxima} (grs/min)	Cumple
Ladrillo rojo recocido	20.63	33.86	21	30	Si, Si
Tabique extruido	18.36	15.94	15	30	No, Si
Tabicón	27.91	8.64	15	30	No, Si

A es la absorción de la pieza sumergida totalmente en agua durante 24 horas.
Cb es la absorción de agua por capilaridad de la pieza durante 10 minutos.

Tabla 3.12 Resistencia de diseño a compresión de las piezas

Tipo de pieza	Experimental	NTCM-2004	
	f_p^* (kgf/cm ²)	f_p^* mínimo (kgf/cm ²)	Cumple
Ladrillo rojo recocido	51	60	No
Tabique extruido	74	100	No
Tabicón	37	100	No

Tabla 3.13 Resistencia de diseño a compresión del mortero

Tipo De Mortero	Experimental	NTCM-2004	
	f_j^* (kgf/cm ²)	f_j^* mínimo (kgf/cm ²)	Cumple
I	141	125	Si

Como puede observarse las piezas empleadas no cumplen con los requisitos de control de calidad que estipulan las normas mexicanas, con respecto al mortero se considera que este cumple satisfactoriamente con las NTCM-2004.

Dado a que no se utilizaron piezas de varios fabricantes sería inadecuado generalizar que todas las piezas de mampostería utilizadas en el D.F. no cumplen con los requisitos mínimos de calidad de las NTCM-2004. Sin embargo, es probable que las piezas que no cumplen con un control de calidad en su proceso de manufactura presenten esta tendencia, ante tal situación los fabricantes deberían incrementar la calidad de sus piezas invirtiendo en mejorar y cuidar sus procesos de manufactura sin dejar a un lado un estricto control de las propiedades de las piezas.

3.4 INSTRUMENTACIÓN Y DISPOSITIVO DE CARGA

3.4.1 Dispositivo de carga

La finalidad del dispositivo de carga es tener el registro de la magnitud de la carga axial aplicada sobre el espécimen en cada instante de la prueba. La medición de la carga se realizó mediante una celda de carga de 50 toneladas de capacidad. El dispositivo de carga se concibió para aprovechar la rótula de la máquina universal y así corregir los problemas de alineación del murete antes de empezar la prueba. Para ello se conectó al extremo inferior de la celda de carga una placa de carga de 1 ¼ pulgada de espesor. La celda de carga se conectó al cabezal empleado para realizar pruebas a flexión. En la figura 3.11 se muestra el esquema del dispositivo.

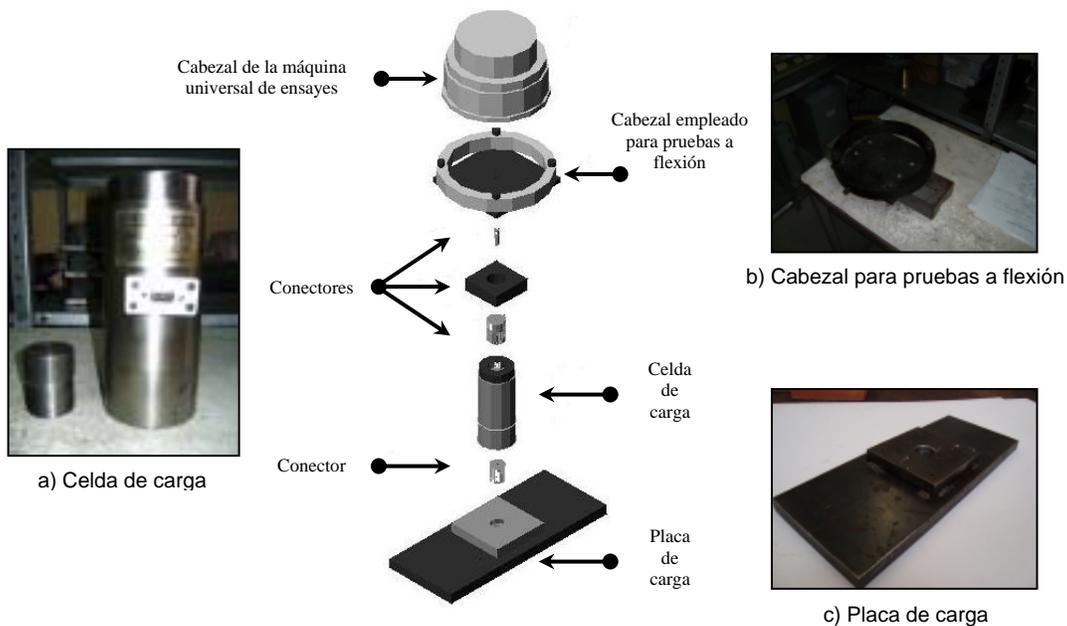


Figura 3.11. Dispositivo de carga

3.4.2 Instrumentación

Se fabricó un dispositivo de medición, el cuál se muestra en la figura 3.12b, cuya función era registrar las deformaciones obtenidas durante la prueba en la parte central del espécimen el mayor tiempo posible. En un principio el dispositivo se colocaba superficialmente sobre dos de los costados del espécimen (lado largo) con pegamento epóxico pero tenía el inconveniente de que este se despegaba rápidamente al comenzar el agrietamiento en la mampostería. Finalmente, se optó por anclar el dispositivo con el pegamento epóxico, dejando un espesor de pegamento entre la superficie del espécimen y del dispositivo de 1mm aproximadamente. El dispositivo está hecho con ángulos y soleras de acero, las cuales fueron unidas con soldadura de arco eléctrico. En la figura 3.12a, se muestra el estado del dispositivo antes y después de la prueba. La medición de la deformación se realiza mediante deformímetros colocados en ambas caras del muro (figura 3.12c).

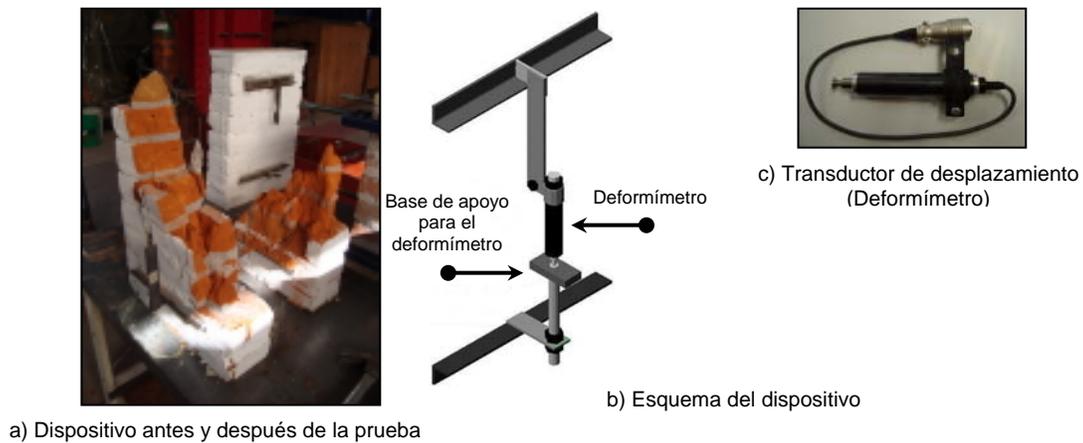


Figura 3.12. Dispositivo de medición

Los deformímetros que se emplearon tienen una precisión de milésimos de milímetro sobre una longitud de 10 mm.

Para la colocación de este dispositivo se nivela la base sobre la cual se coloca el espécimen. Una vez colocado el espécimen se marcan las líneas de referencia que indican la posición correcta sobre la cual se desea fijar el dispositivo en la parte central. Para mantener y cuidar la longitud calibrada se colocan espárragos a una distancia cercana de los extremos de los ángulos del dispositivo, los cuales se sujetan con tuercas para dar la rigidez suficiente y mantener la alineación correcta del dispositivo. Se perforan los orificios que sirven para anclar el dispositivo al espécimen, se extrae el polvo alojado en los orificios producto de la perforación, se prepara el pegamento epóxico, se coloca pegamento en el interior de los orificios y finalmente se ancla el dispositivo con tornillos. La verticalidad del dispositivo se cuida revisando con un nivel de mano la vertical entre los ángulos que delimitan la longitud calibrada.

En la figura 3.13, se indican los detalles de la ubicación de los deformímetros, que se emplearon en este estudio, para obtener el registro de las deformaciones en la parte central del espécimen.

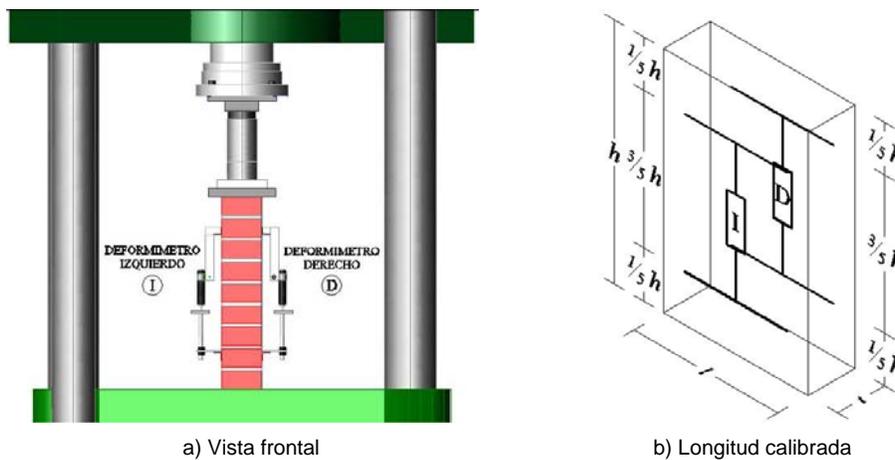


Figura 3.13. Ubicación del dispositivo con los deformímetros

3.4.3 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se empleó para llevar el registro de las deformaciones presentadas en la parte central de los especímenes, así como de la magnitud de la carga aplicada durante la duración de la prueba. Los datos obtenidos se almacenan en una computadora con la ayuda de un software especializado en la adquisición de los datos. La operación y captura de datos es totalmente manual, pues hay que especificar en que momento se desea guardar un dato en particular, para esto se realiza un registro de los puntos de interés para obtener la curva esfuerzo-deformación (figura 3.14). Cabe mencionar que el sistema se especializa en el registro de cargas estáticas, por lo que se tuvo la limitante de no contar con un equipo especializado en la captura de cargas dinámicas lo que se refleja en una limitada discretización de los puntos que forman la curva esfuerzo-deformación. Este problema se presentó en las pruebas realizadas a una velocidad de 0.5333 mm/seg, ya que se obtenían entre cuatro ó cinco puntos para delimitar la curva esfuerzo deformación.



a) Automatic Switching Box
ASW – 30C



b) Equipo completo



c) Remote data Logger
TDS-300

Figura 3.14. Sistema de adquisición de datos

3.4.4 Máquina universal de ensayos

La máquina universal de ensayos utilizada para realizar todas las pruebas referentes a compresión fue una máquina INSTRON modelo 5500 Hydraulic Xtend, se encuentra dentro de las instalaciones del Laboratorio de Estructuras de la UAM-Azcapotzalco. Esta máquina, puede realizar tanto pruebas de tensión como pruebas de compresión axial. Cuenta con una capacidad máxima de carga de 400,000 lb (181.440 ton), la carga aplicada se controla por desplazamiento, la precisión de la medida de carga con el sistema de medición (sistema automatizado) es de 0.1 kg, la máquina registra el promedio de 60 lecturas/segundo de carga-deformación con una precisión en la medida de las deformaciones de 0.001 pulgadas (0.0254 mm) aproximadamente. El intervalo de velocidades de deformación que maneja va desde 0 mm/min hasta 114.3 mm/min (1.905 mm/seg). En la figura 3.15, se muestra la imagen de la máquina universal de ensayos empleada para efectuar las pruebas a compresión axial sobre las piezas, cubos de mortero y muretes de mampostería.



Figura 3.15. Máquina universal de ensayos

3.5 OBTENCIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA

Inicialmente, la curva esfuerzo-deformación trató de estimarse con base sólo en las lecturas de los deformímetros colocados en la parte central de espécimen. Note que para tratar de minimizar los efectos de las restricciones que el dispositivo de carga y la máquina universal ejercen sobre los extremos del espécimen el dispositivo de medición se colocó dejando una hilada libre en ambos extremos del muro.

3.5.1 Obtención de la curva experimentalmente

Este procedimiento tiene el inconveniente que después que se presenta el esfuerzo máximo en el espécimen, las grietas ocasionadas por el modo de falla de la mampostería tienden a ocasionar que los dispositivos de medición se deslicen y/o giren sobre la base en la cual se apoyan los deformímetros, registrando mediciones inexactas. En la mayoría de los casos se observó que esta estrategia de medición sólo es confiable en la rama ascendente hasta el esfuerzo máximo. En algunas ocasiones fue posible obtener una parte de la curva esfuerzo-deformación después del esfuerzo máximo. En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18, se muestran las curvas obtenidas en la parte central.

Note como en el caso de tabique rojo y tabicón se pudo registrar confiablemente una parte de la rama descendente de la curva esfuerzo-deformación (hasta donde las lecturas de los deformímetros son similares), mientras que en el caso del tabique extruido la medición en la rama descendente es mucho más problemática debido al modo de falla frágil y explosivo que se observó en los especímenes.

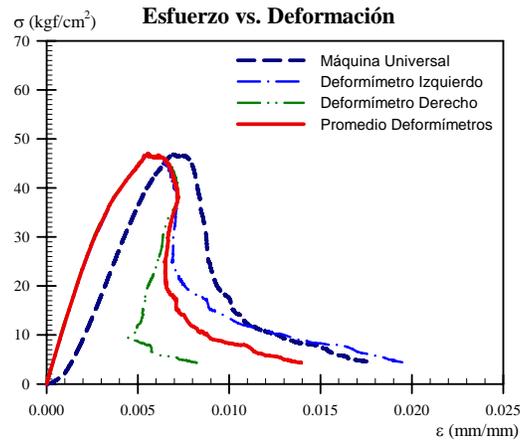


Figura 3.16. Curva esfuerzo-deformación para un murete de piezas de ladrillo rojo recocido (0.0016 mm/seg)

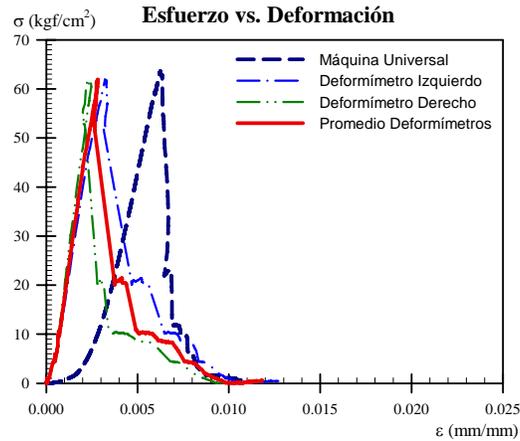


Figura 3.17. Curva esfuerzo-deformación para un murete de piezas de tabique extruido (0.0016 mm/seg)

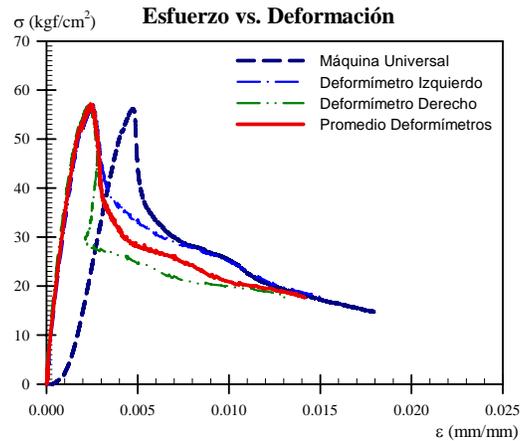


Figura 3.18. Curva esfuerzo-deformación para un murete de piezas de tabicón (0.0016 mm/seg)

3.5.2 Obtención de la curva mediante una corrección analítica

Debido a la dificultad de tener mediciones confiables de los deformímetros una vez que los especímenes han alcanzado el esfuerzo máximo se decidió estimar la curva esfuerzo-deformación tomando como base el desplazamiento del cabezal de la máquina universal y aplicándole una corrección analítica propuesta por Priestley y Elder (1982).

La corrección se realiza en dos partes, primero se corrigen los desplazamientos de la rama ascendente y después los de la rama descendente de la curva carga-desplazamiento registrada por la máquina universal de ensayos. Para poder realizar la corrección es necesario emplear las mediciones de los deformímetros en la rama ascendente de la curva carga-desplazamiento por lo que es necesario que las lecturas obtenidas de la rama ascendente sean confiables. Cabe señalar que originalmente las lecturas obtenidas con la celda de carga están en unidades de fuerza y que las lecturas registradas por los deformímetros se encuentran en unidades de longitud. Las curvas esfuerzo-deformación se obtienen dividiendo las cargas entre el área neta de la sección transversal del prisma para convertirlos en esfuerzos, los desplazamientos se dividen entre la longitud de la altura total del prisma, cuando se utilizan las lecturas de la máquina universal, o la longitud calibrada, cuando se utiliza las lecturas de los deformímetros, para convertirse en deformaciones unitarias.

El método considera que el daño del prisma se concentra en su parte central debido a la restricción que el dispositivo de carga ejerce sobre las hiladas superior e inferior (figura 3.19). En este estudio se hizo la suposición de que el daño se concentra en $3/5$ partes de la altura del prisma.

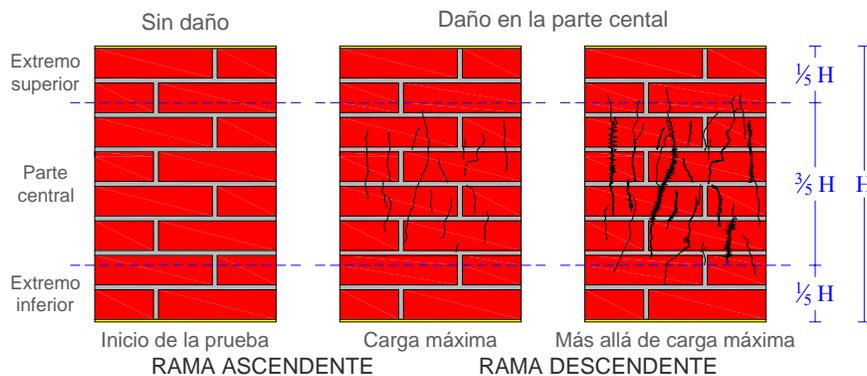


Figura 3.19. Idealización del daño de los especímenes de mampostería durante la prueba

3.5.2.1 Corrección analítica de la rama ascendente hasta el esfuerzo máximo

Como puede observarse en la figura 3.20, los desplazamientos registrados por la máquina universal son mayores que los registrados por los deformímetros. Esto es debido a que la medición de la máquina universal incluye la deformación del espécimen y las deformaciones debidas al reacomodo del dispositivo de carga y del cabeceo del espécimen principalmente, además se tienen las deformaciones de las placas con las que se aplica la carga y la deformación de la base de la máquina universal mismas que por lo regular son pequeñas.

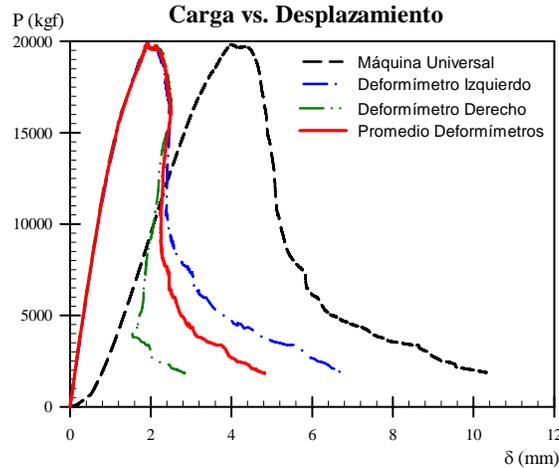


Figura 3.20. Curvas carga-desplazamiento de máquina universal y de transductores de desplazamiento

El desplazamiento corregido se calcula conforme la ecuación (3.8):

$$\delta_{\text{corregido}} = \delta_{\text{mu}} - \Delta t - f * P \tag{3.8}$$

donde δ_{mu} es el desplazamiento registrado en la máquina universal, Δt es el desplazamiento debido al reacomodo del cabeceo y del dispositivo de carga, f es la flexibilidad del dispositivo de carga y de la máquina universal (ya que tiene unidades de longitud entre fuerza) y P es la carga asociada al valor de desplazamiento de la curva de la máquina universal que se desea corregir.

Como se aprecia en la figura 3.21, la curva carga-desplazamiento la máquina universal no comienza a partir del origen debido al reacomodo de las juntas, al efecto del reacomodo del cabeceo y al dispositivo de carga. El valor de Δt no es más que el desplazamiento que le toma al conjunto dispositivo de carga-espécimen en manifestar una relación lineal de la carga con respecto a los desplazamientos.

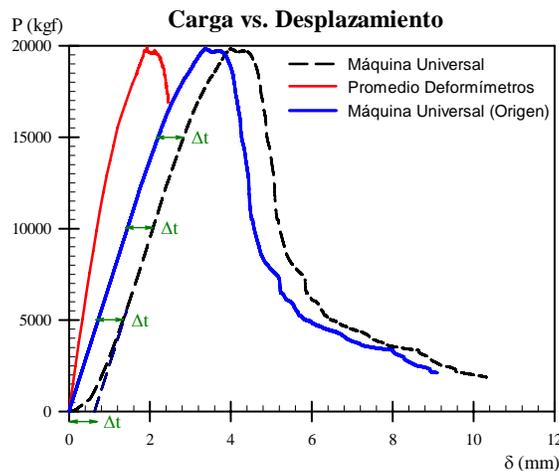


Figura 3.21. Curva carga-desplazamiento de la máquina universal con inicio en el origen

Para obtener el valor de Δt , es necesario calcular la ecuación lineal de la rama ascendente de la curva carga-desplazamiento registrada por la máquina universal en su parte elástica, dicha ecuación es de la forma $P = A_{mu} * \delta_{mu} + B_{mu}$, A_{mu} es la pendiente de la recta y B_{mu} es el valor de la ordenada donde intersecta la recta. Una vez conocidos los parámetros que definen la ecuación de interés, basta con encontrar el valor de desplazamiento que corresponde a una carga igual a cero.

El valor de desplazamiento Δt , se obtiene con la ecuación (3.9):

$$\Delta t = -\frac{B_{mu}}{A_{mu}} \quad (3.9)$$

En la figura 3.22 se observa que después de eliminar el efecto del reacomodo del cabeceo y del dispositivo de carga las curvas asociadas a las lecturas de la máquina universal y a los deformímetros no coinciden. Esta diferencia se debe a las deformaciones que se presentan desde los cabezales hasta la base de la máquina universal, este desplazamiento se cuantifica mediante el producto $f * P$. Note que el valor de f depende del tipo de la máquina universal, del dispositivo de carga utilizado y del espécimen. Físicamente es muy complicado llevar el registro de tal desplazamiento durante la prueba, ya que implica una instrumentación adicional sobre la máquina universal la cual no es objeto de estudio en este trabajo experimental. Sin embargo, esta diferencia de desplazamiento que existe entre la curva registrada por la máquina universal sobre todo el espécimen y con los transductores de desplazamiento colocados en la parte central, se puede obtener razonablemente a partir de las pendientes de tales curvas respectivamente (A_{mu} y A_{td}). A_{td} es la pendiente de la recta de la rama ascendente de la curva registrada por los transductores de desplazamiento. El valor de f se obtiene con la ecuación (3.10):

$$f = f_{mu} - f_{td} = \frac{1}{A_{mu}} - \frac{1}{A_{td}} \quad (3.10)$$

En la figura 3.22 se observa la curva carga-desplazamiento de la máquina universal con inicio en el origen al quitar el efecto de flexibilidad adicional inducido por el dispositivo de carga y la máquina universal.

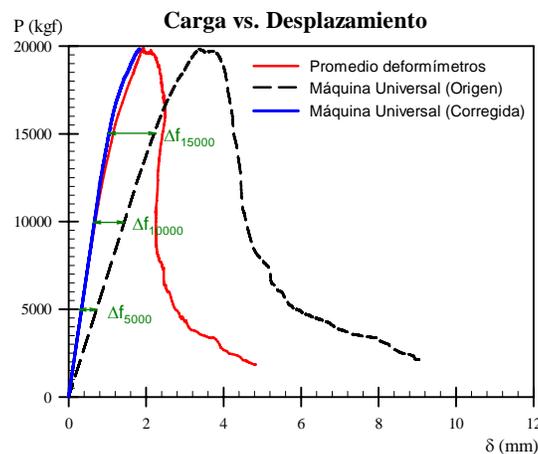


Figura 3.22. Curva carga-desplazamiento de la máquina universal corregida

3.5.2.2 Corrección analítica de la rama descendente después del esfuerzo máximo

En la curva carga-desplazamiento de la máquina universal, después de la carga máxima se presenta una pendiente mayor en comparación a la que se observa en la curva carga-desplazamiento promedio de los transductores de desplazamiento. Esta diferencia se atribuye a la flexibilidad de la máquina universal y la recuperación que se presenta en las hiladas en los extremos del espécimen debido a que no se encuentran totalmente dañadas por la restricción ocasionada por las placas superior e inferior de la máquina universal (figura 3.23).

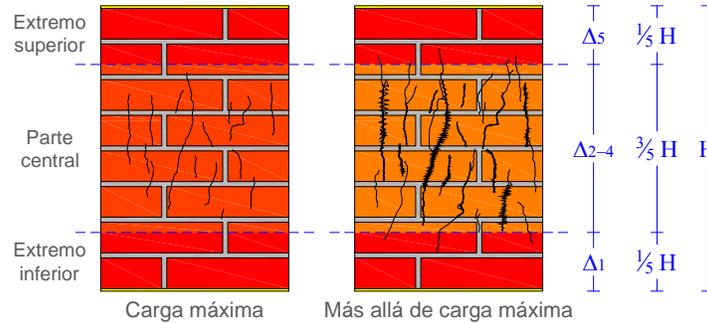


Figura 3.23. Desplazamientos considerados en la corrección de rama descendente

El incremento de desplazamiento Δ_s en la curva esfuerzo-deformación de la máquina universal después del esfuerzo máximo es:

$$\Delta_s = \Delta_{2-4} - \Delta_{1,5} - \Delta_f = \Delta_{2-4} - (\Delta_1 + \Delta_5) - \Delta_f \quad (3.11)$$

donde Δ_{2-4} es el incremento de desplazamiento en la parte central, $\Delta_{1,5}$ es el decremento de desplazamiento en los extremos y Δ_f es la descarga de flexibilidad ocasionada por la máquina universal.

Suponiendo que en los extremos la recuperación es elástica y usando el módulo de elasticidad de la mampostería se tiene que:

$$\Delta_{2-4} = \Delta_s + \Delta_{1,5} + \Delta_f \quad (3.12)$$

$$\Delta_{2-4} = \Delta_s + \frac{(P_{max} - P) \frac{2}{5} H}{A_g E_m} + f(P_{max} - P) \quad (3.13)$$

en donde P es la carga asociada a la deformación a corregir, P_{max} es la carga máxima resistida por el espécimen, $2/5H$ es la suma de longitud de los extremos, A_g es el área gruesa de la sección transversal normal a la aplicación de la carga.

El incremento de deformación en la parte central después de la carga máxima es:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_{2-4}}{\frac{3}{5} H} \quad (3.14)$$

en donde $3/5H$ es la longitud calibrada donde se considera se concentra el daño en la parte central del espécimen.

Finalmente:

$$\varepsilon_{\text{corregida}} = \varepsilon_{P_{\text{max}}} + \varepsilon_i \quad (3.15)$$

en donde $\varepsilon_{P_{\text{max}}}$ es la deformación unitaria corregida cuando se presenta la carga máxima.

En la figura 3.24, se muestra una curva esfuerzo-deformación aplicando el método de corrección analítico. Note que las ecuaciones 3.8 a 3.15, sólo son válidas para la geometría del espécimen estudiado. Sin embargo, siguiendo el procedimiento descrito se pueden adaptar para otras geometrías.

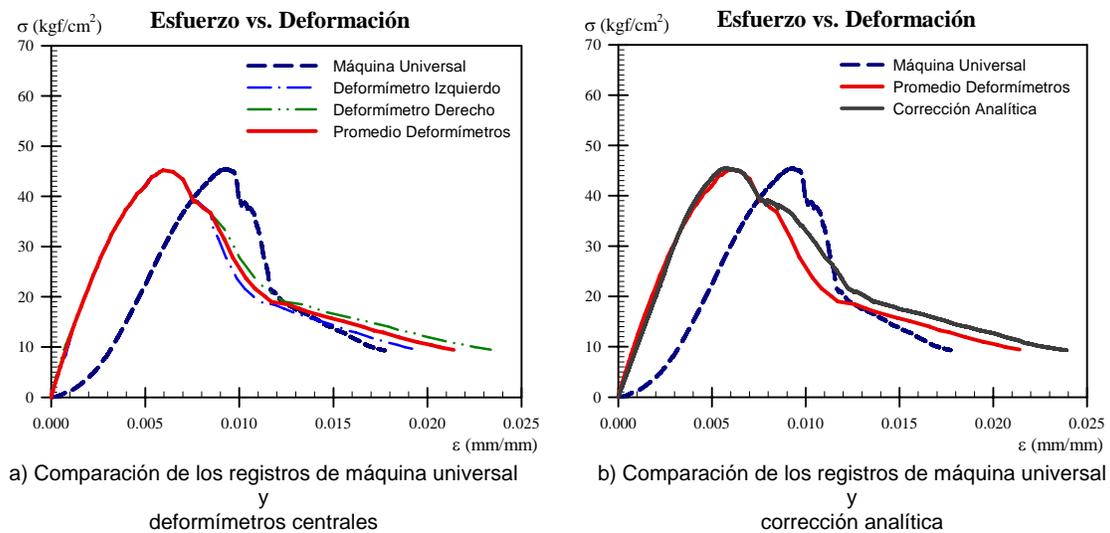


Figura 3.24. Corrección analítica

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ensayaron un total de 47 especímenes de los cuales 22 fueron de ladrillo rojo recocido, 11 de tabique extruido vertical y 14 de tabicón. Sin embargo, finalmente no todos fueron considerados debido a que algunos presentaron fuertes problemas de excentricidad ocasionados por la construcción del prisma y el proceso de cabeceo principalmente, lo que originaba que las lecturas esperadas con la instrumentación de los deformímetros fueran erróneas.

Una vez que se consideró que se contaba con evidencia experimental necesaria para la elaboración de los modelos, se dió por terminada la etapa experimental y se procedió a la elaboración de los modelos. En lo que respecta a las curvas que se utilizaron para el ajuste del modelo analítico, se optó por aplicar el método de corrección analítico de Priestley y Elder (1982).

En cuanto a los criterios de aceptación, el más importante para considerar si los resultados arrojados por la prueba eran aptos para el objetivo de estudio, fue el que las diferencias de las lecturas de los dos deformímetros no excediera de un 15% la parte elástica de la rama ascendente; sin embargo, se admitieron algunas curvas que registraron una diferencia de un 30% entre dichas lecturas, sobre todo en el intervalo considerado para calcular los módulos de elasticidad de la mampostería.

El tipo de falla del espécimen y las características del dispositivo de medición ocasionaban que algunas veces los deformímetros giraran sobre su base provocando lecturas poco confiables. Después de revisar las lecturas se corroboraba que el módulo de elasticidad y la deformación asociada al esfuerzo pico fueran similares a los obtenidos por Meli y Hernández (1971) y a los resultados ya confiables que se iban acumulando de los ensayos.

4.1.1 Resistencia de las mamposterías

A partir de las curvas experimentales se observó que la mampostería más resistente es la fabricada con tabique extruido, este resultado era de esperarse debido a que su proceso de manufactura es de mejor calidad respecto al de las otras piezas consideradas. La mampostería menos resistente fue la de ladrillo rojo recocido. En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se muestra la comparación de las resistencias nominales promedio ($f'm$) entre los resultados de este estudio con los resultados obtenidos por Meli y Hernández (1971) para piezas pegadas con un mortero tipo I.

Tabla 4.1 Comparación de resistencias para mamposterías de ladrillo rojo recocido

Meli y Hernández (1971)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa			2da. Etapa		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
7 x 14 x 28	T1	166	52	21	135	64	30
	T2	157	52	29	-	-	-
	T3	166	51	43	-	-	-
	T4	161	114	59	135	112	54
	T5	163	80	49	125	64	42
	T6	163	85	26	125	109	39
	T7	108	93	46	125	76	38
	T8	157	33	16	-	-	-
	T9	158	53	31	-	-	-
	T10	157	45	23	140	43	18
	T11	166	36	16	125	45	12
Este estudio (2009)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos			Rápidos		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
5.5 x 11.75 x 23.5	Desconocido	214	96	49	248	96	59

Tabla 4.2. Comparación de Resistencias para mamposterías de tabique extruido

Meli y Hernández (1971)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa			2da. Etapa		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
6 x 10 x 20	TE2	158	376	233	92	308	174
	TE3	108	169	124	-	-	-
	TE5	161	486	260	160	473	197
Este estudio (2009)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos			Rápidos		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
6 x 12 x 24	Puebla	327	100	65	250	100	69

Tabla 4.3. Comparación de resistencias para mamposterías de tabicón

Meli y Hernández (1971)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa			2da. Etapa		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
10 x 14 x 28	TC1	108	31	23	81	65	43
	TC2	178	76	36	81	123	73
	TC3	108	59	53	92	63	43
	TC4	178	36	16	-	-	-
Este estudio (2009)							
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos			Rápidos		
		f_j	f_p	\bar{f}_m	f_j	f_p	\bar{f}_m
6 x 12 x 24	Azcapotzalco	198	74	54	158	74	71

En las tablas 4.1 a 4.3 f_j es la resistencia nominal promedio a compresión del mortero, f_p es la resistencia nominal promedio a compresión de la pieza, \bar{f}_m es la resistencia nominal promedio a compresión de los prismas. Todos en unidades de kgf/cm^2 .

4.1.2 Módulo de Elasticidad

Los resultados experimentales indican que los prismas de tabicón resultaron tener una mayor rigidez en comparación con los otros dos tipos de prismas, mientras que los prismas más flexibles fueron los de ladrillo rojo recocido. En las tablas 4.4, 4.5 y 4.6, se muestra la comparación de los módulos de elasticidad promedio (E_m) entre los resultados de este estudio con los resultados obtenidos por Meli y Hernández (1971) para piezas pegadas con un mortero tipo I.

Tabla 4.4 Comparación de los módulos de elasticidad para mamposterías de ladrillo rojo recocido

Meli y Hernández (1971)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa	2da. Etapa
		E_m	E_m
7 x 14 x 28	T1	5,000	8,000
	T2	7,000	-
	T3	9,000	-
	T4	15,000	12,000
	T5	13,000	12,000
	T6	8,000	12,000
	T7	14,000	11,000
	T8	5,000	-
	T9	9,000	-
	T10	4,000	5,000
	T11	4,000	4,000
Este estudio (2009)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos	Rápidos
		E_m	E_m
5.5 x 11.75 x 23.5	Desconocido	10,760	10,290

Tabla 4.5. Comparación de los módulos de elasticidad para mamposterías de tabique extruido

Meli y Hernández (1971)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa	2da. Etapa
		E_m	E_m
6 x 10 x 20	TE2	52,000	52,000
	TE3	25,000	-
	TE5	91,000	91,000
Este estudio (2009)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos	Rápidos
		E_m	E_m
6 x 12 x 24	Puebla	25,050	24,655

Tabla 4.6. Comparación de los módulos de elasticidad para mamposterías de tabicón

Meli y Hernández (1971)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	1ra. Etapa	2da. Etapa
		E_m	E_m
10 x 14 x 28	TC1	16,000	28,000
	TC2	18,000	33,000
	TC3	25,000	22,000
	TC4	10,000	-
Este estudio (2009)			
Dimensiones (cm)	Procedencia	Lentos	Rápidos
		E_m	E_m
6 x 12 x 24	Azcapotzalco	31,860	35,480

En las tablas 4.4 a 4.6 E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería en kgf/cm^2 .

4.1.3 Deformación asociada al esfuerzo máximo

La deformación de falla asociada al esfuerzo máximo fue el parámetro que confirmó que el dispositivo de medición empleado funciona razonablemente. Se observó que la deformación asociada a la falla de las mamposterías en estudio es muy similar a las obtenidas por Meli y Reyes (1971). En la tabla 4.7, se muestran las deformaciones promedio asociadas a la falla, obtenidas por Meli y Reyes (1971) y las obtenidas en este estudio, para piezas unidas con mortero tipo I.

Tabla 4.7. Comparación de las deformaciones asociadas a la falla

Tipo de Mampostería	Espécimen	ϵ_{falla}
Ladrillo rojo recocido	T10	0.0063
	T11	0.0061
	Lentos	0.0056
	Rápidos	0.0067
Tabique extruido vertical	TE2	0.0044
	Lentos	0.0026
	Rápidos	0.0032
Tabicón	TC1	0.0016
	Lentos	0.0022
	Rápidos	0.0022

4.1.4 Velocidad de carga

Como lo reportan Priestley y Elder (1982), efecto en el incremento en la velocidad de carga se refleja principalmente en la resistencia del espécimen, sin dejar a un lado otras características como lo son los módulos de elasticidad y las deformaciones asociadas a la falla. A partir de los datos obtenidos en este estudio se puede apreciar como el efecto del incremento en la velocidad de carga, aumenta la resistencia del murete de mampostería, para cada tipo de material este incremento fue diferente. Para los muretes de ladrillo rojo recocido el incremento fue del orden de un 20%, mientras que para los muretes de tabique extruido vertical el incremento que se presentó fue de un 7%. Sin embargo, hubo dos especímenes que experimentaron un incremento del 25%. Los muretes de tabicón ensayados a velocidad rápida indican que incrementaron su resistencia en un 30%.

4.1.5 Curva esfuerzo-deformación

En esta parte se comentan los aspectos observados a partir de los datos obtenidos, en cuanto a la forma de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas.

4.1.5.1 Rama ascendente

El comportamiento de la rama ascendente, de las curvas esfuerzo-deformación para las mamposterías en México ha sido bien estudiado hasta la resistencia máxima. Con lo mencionando en las secciones anteriores de este capítulo se considera que las ramas ascendentes obtenidas en este estudio son correctas ya que las deformaciones unitarias

asociadas a la resistencia máxima y los módulos de elasticidad de las mamposterías estudiadas son parecidas a las obtenidas por Meli y Hernández (1971). Como puede observarse en las figuras 4.1 a 4.6, en general, la forma de la parte ascendente de la curva esfuerzo-deformación tiende a ser parabólica después del primer agrietamiento. Sin embargo, para el caso de tabique extruido y tabicón la variación puede simplificarse a un modelo lineal.

Note que la forma de la parte ascendente es consistente con los estudios de Meli y Reyes (1971) y Meli y Hernández (1971).

4.1.5.2 Rama descendente

En lo que respecta a la rama descendente de la curva esfuerzo-deformación, las pendientes observadas indican que la mampostería con base en tabique extruido vertical después de que se ha alcanzado el esfuerzo máximo es muy frágil y su esfuerzo residual es muy bajo. Después le sigue la mampostería con base en ladrillo rojo recocido y finalmente la mampostería de tabicón que es la menos frágil. El efecto del incremento en la velocidad de carga afecta principalmente el esfuerzo residual de la mampostería, ya que este se ve disminuido para los especímenes ensayados a velocidad rápida (figuras 4.1 a 4.6).

Para los especímenes ensayados se observó que el tipo de falla fue ocasionado por el agrietamiento de la pieza. En el apéndice A se muestra un registro fotográfico del estado de los especímenes para varios niveles de deformación unitaria.

Cabe señalar que en algunas ramas descendentes de las curvas esfuerzo-deformación reportadas no se presentó al 100% la suposición de que el daño del espécimen se concentra en la parte central sobre $3/5$ partes la altura del espécimen, se observó que en tales especímenes parte de los extremos después de la carga máxima sufrieron daño, por lo que existe una sobreestimación en el incremento de desplazamiento de los extremos al ser considerados totalmente elásticos. Debido a que no se conoce con certeza que porcentaje de los extremos se conservaron elásticos se decidió no realizar modificación alguna al respecto, ya que el daño que se observa a través de las grietas es externo.

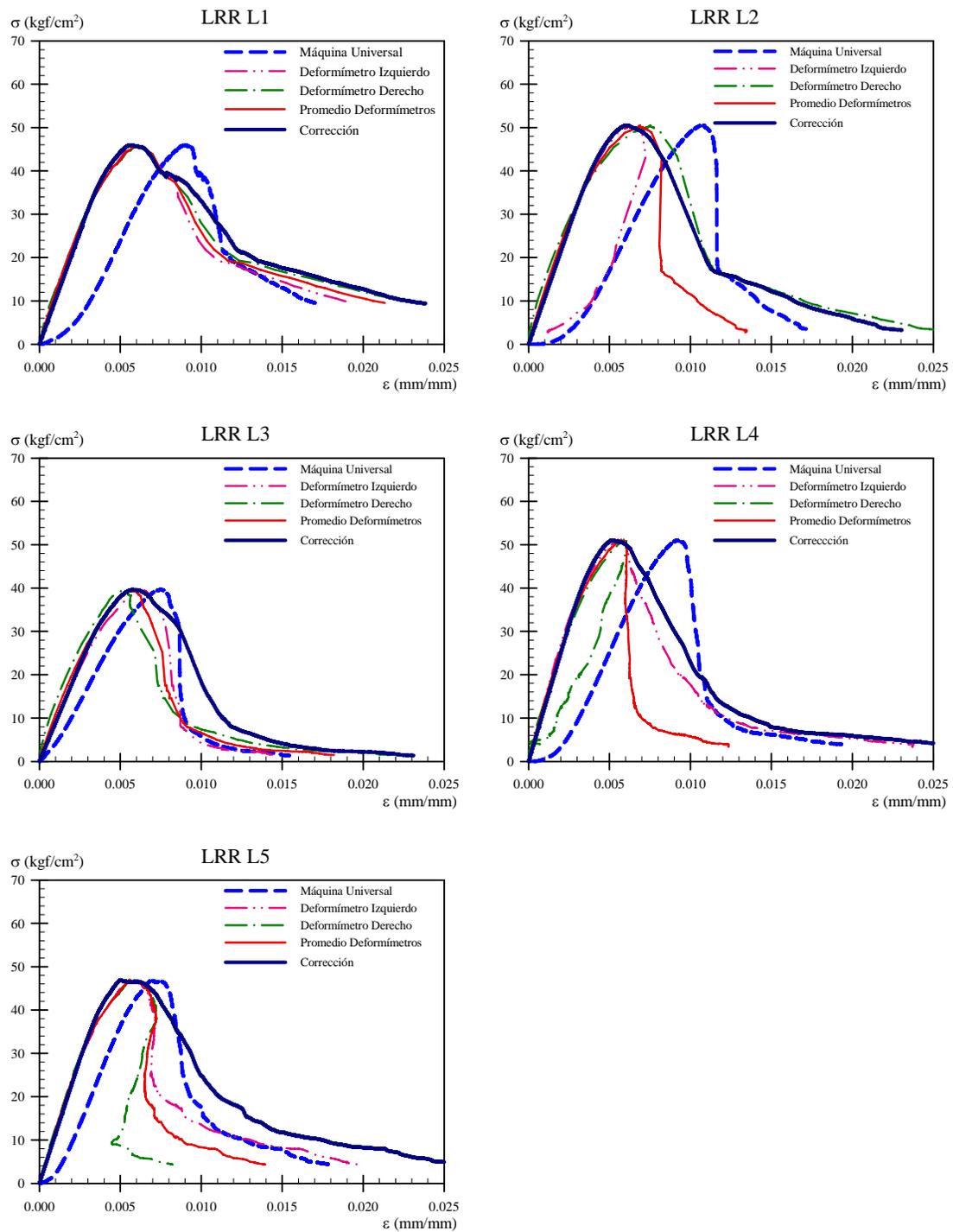


Figura 4.1. Mamposterías de ladrillo rojo recocido ensayadas a una velocidad de 0.0016 mm/seg

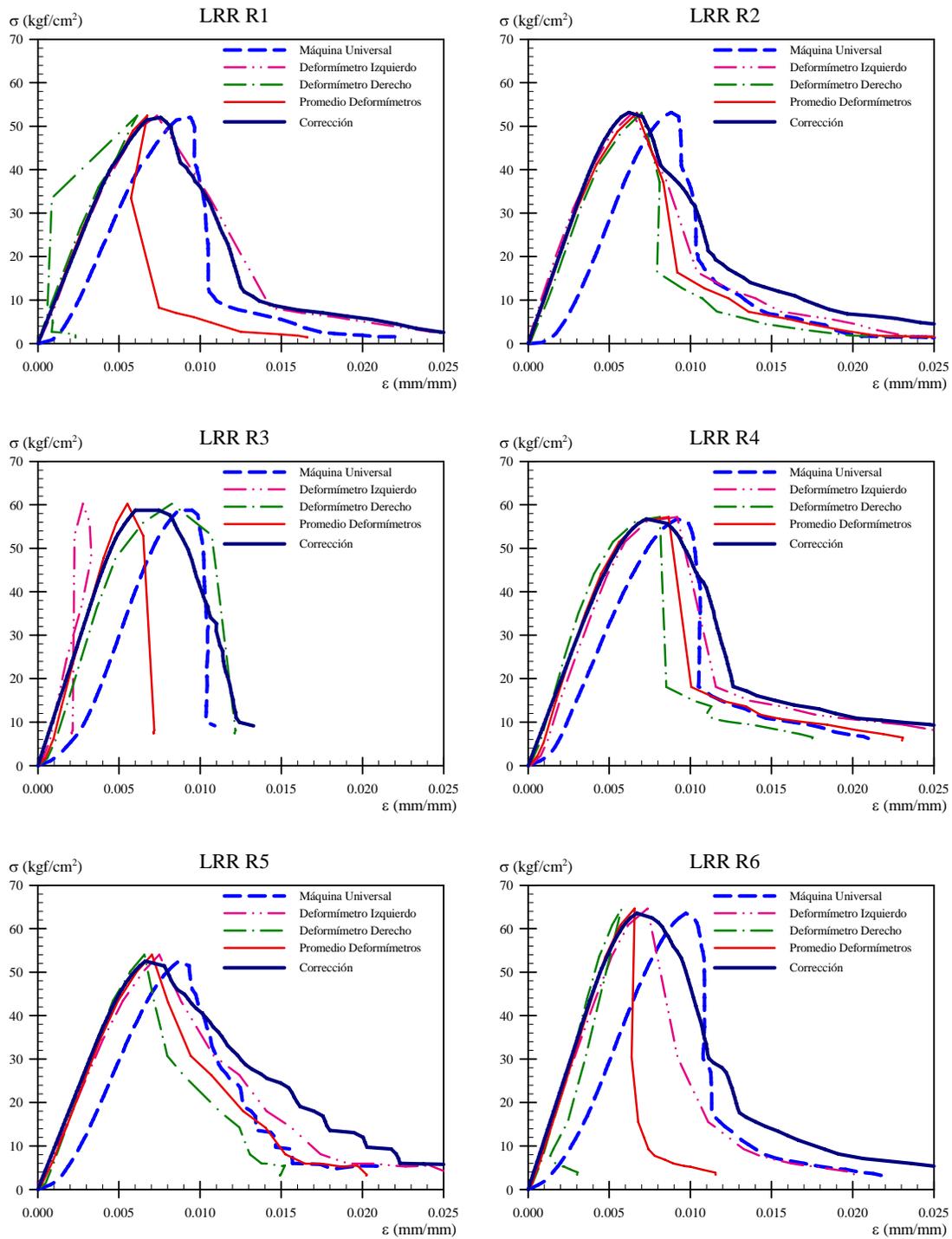


Figura 4.2. Mamposterías de ladrillo rojo recocido ensayadas a una velocidad de 0.5333 mm/seg

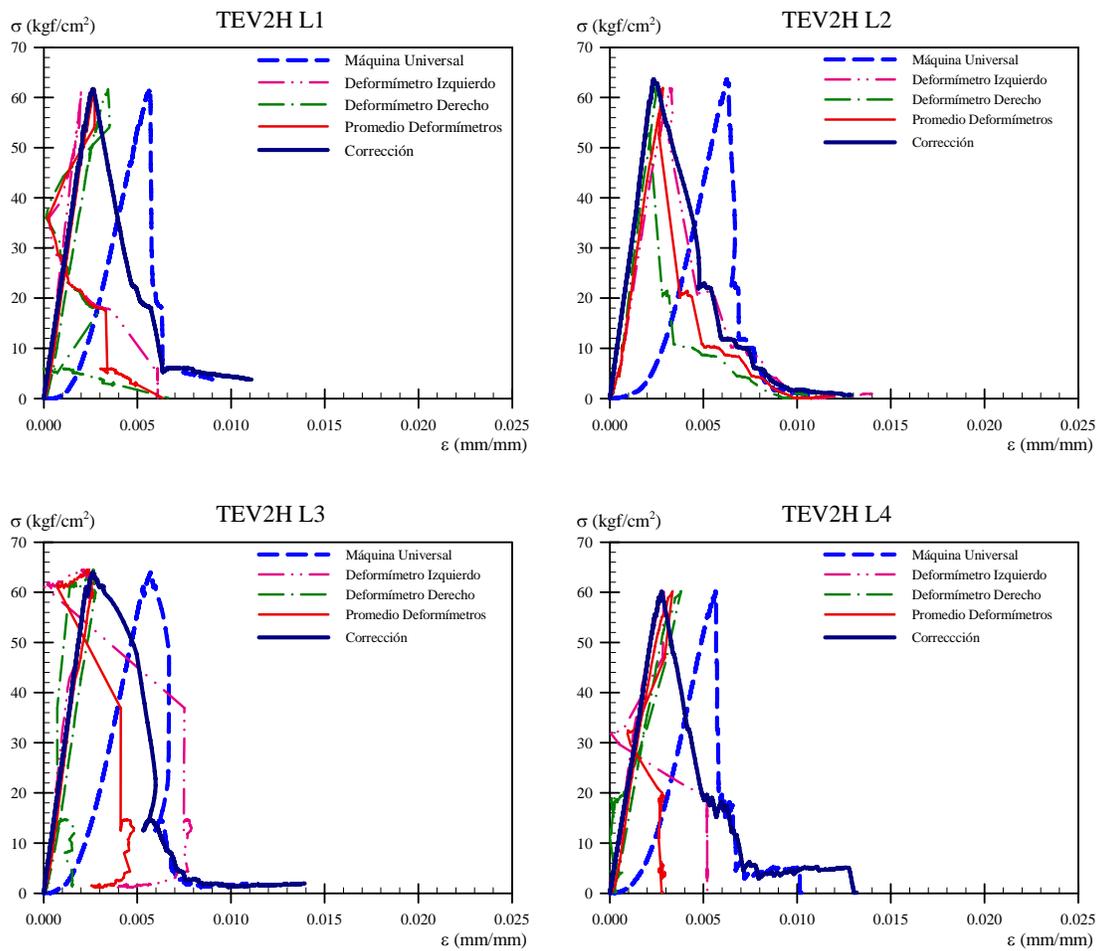


Figura 4.3. Mamposterías de tabique extruido vertical ensayadas a una velocidad de 0.0016 mm/seg

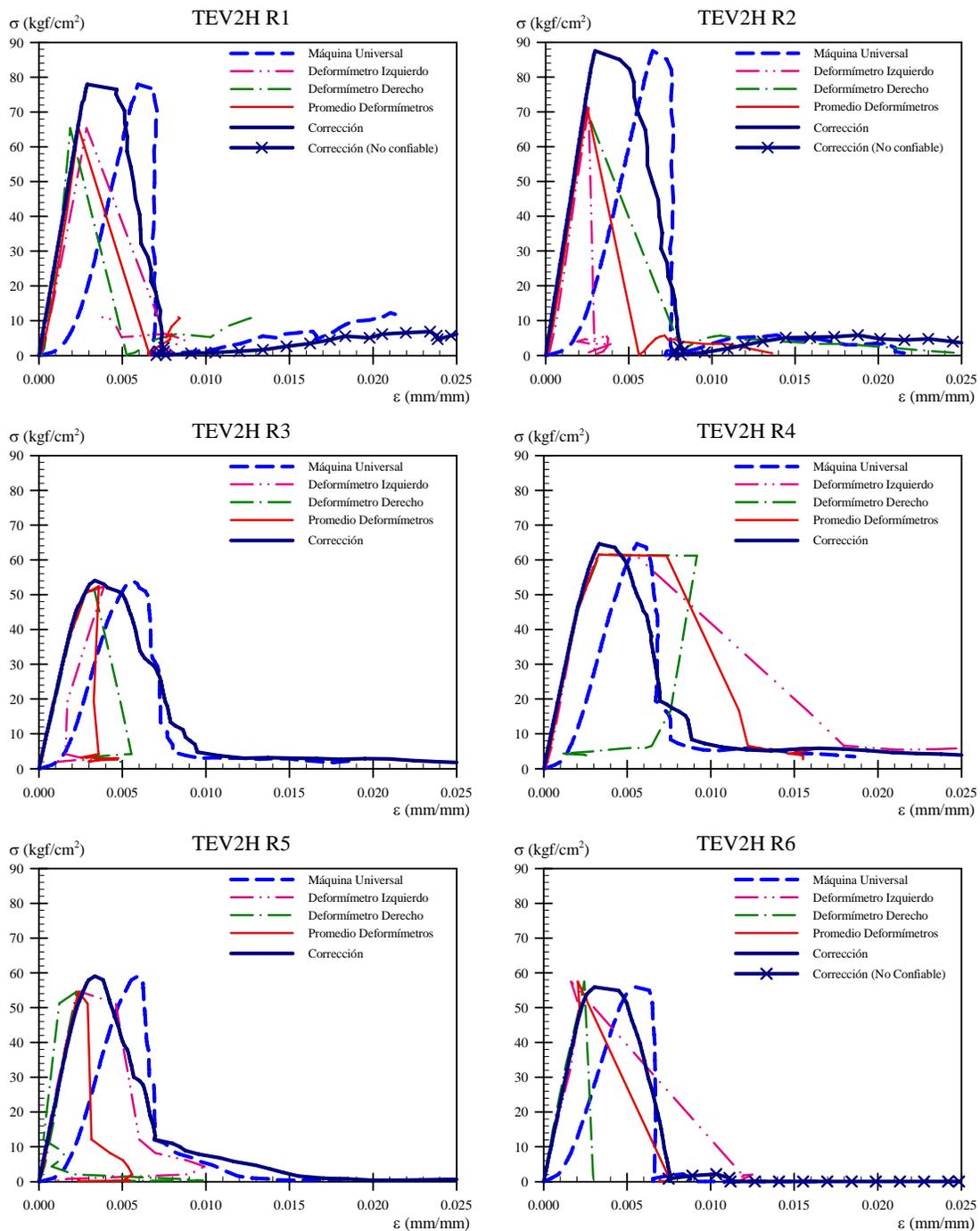


Figura 4.4. Mamposterías de tabique extruido vertical ensayadas a una velocidad de 0.5333 mm/seg

Note que en la figura 4.4 algunos especímenes en la corrección de rama descendente tienen la leyenda de “Corrección (No confiable)”, esto se debe a que la rama descendente cae totalmente sin presentar antes un esfuerzo residual. Este fenómeno físicamente indica que el espécimen se ya no tiene la capacidad de soportar carga, se debe a la velocidad de carga y al modo de falla explosivo de la mampostería después de alcanzar su carga máxima.

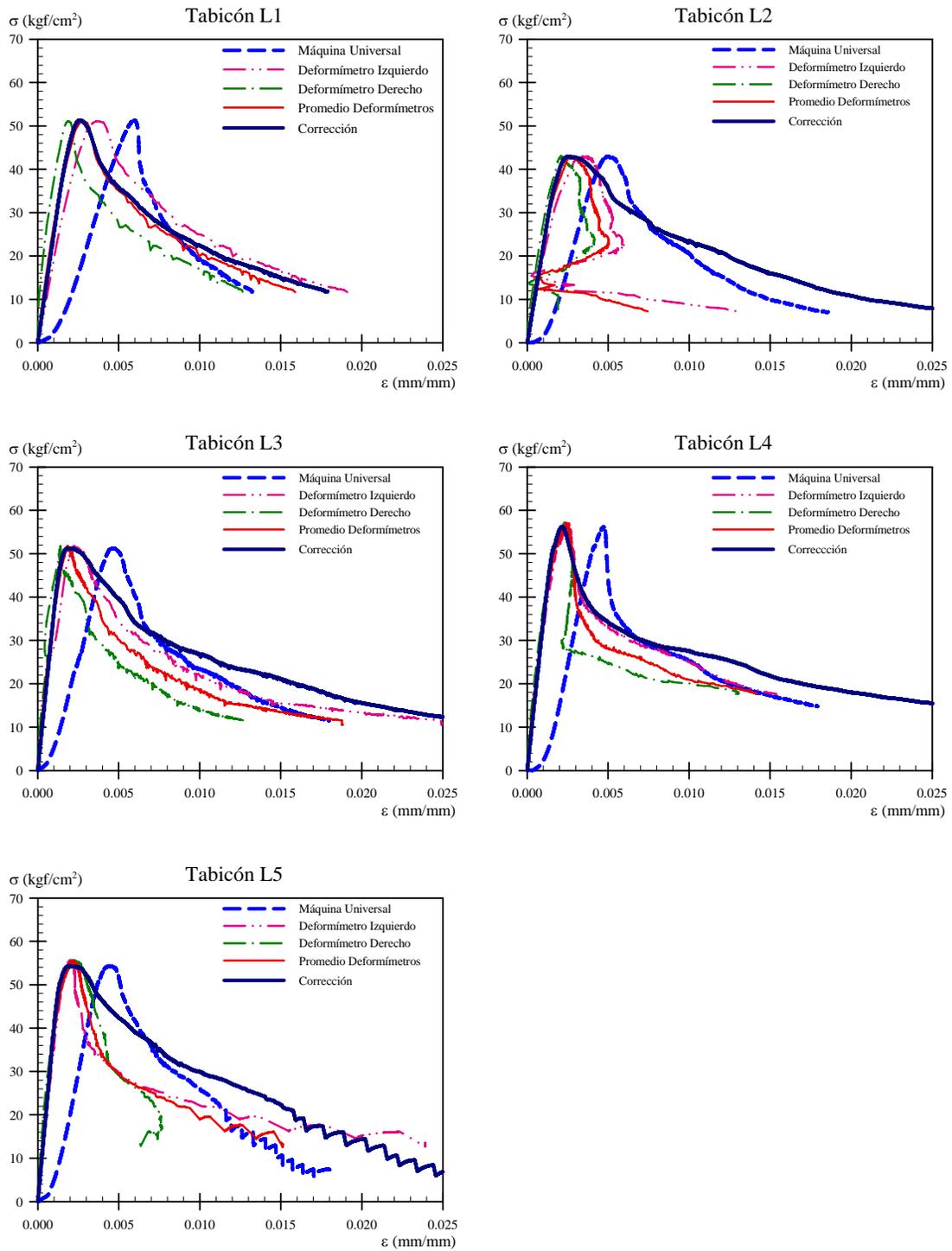


Figura 4.5. Mamposterías de tabicón ensayadas a una velocidad de 0.0016 mm/seg

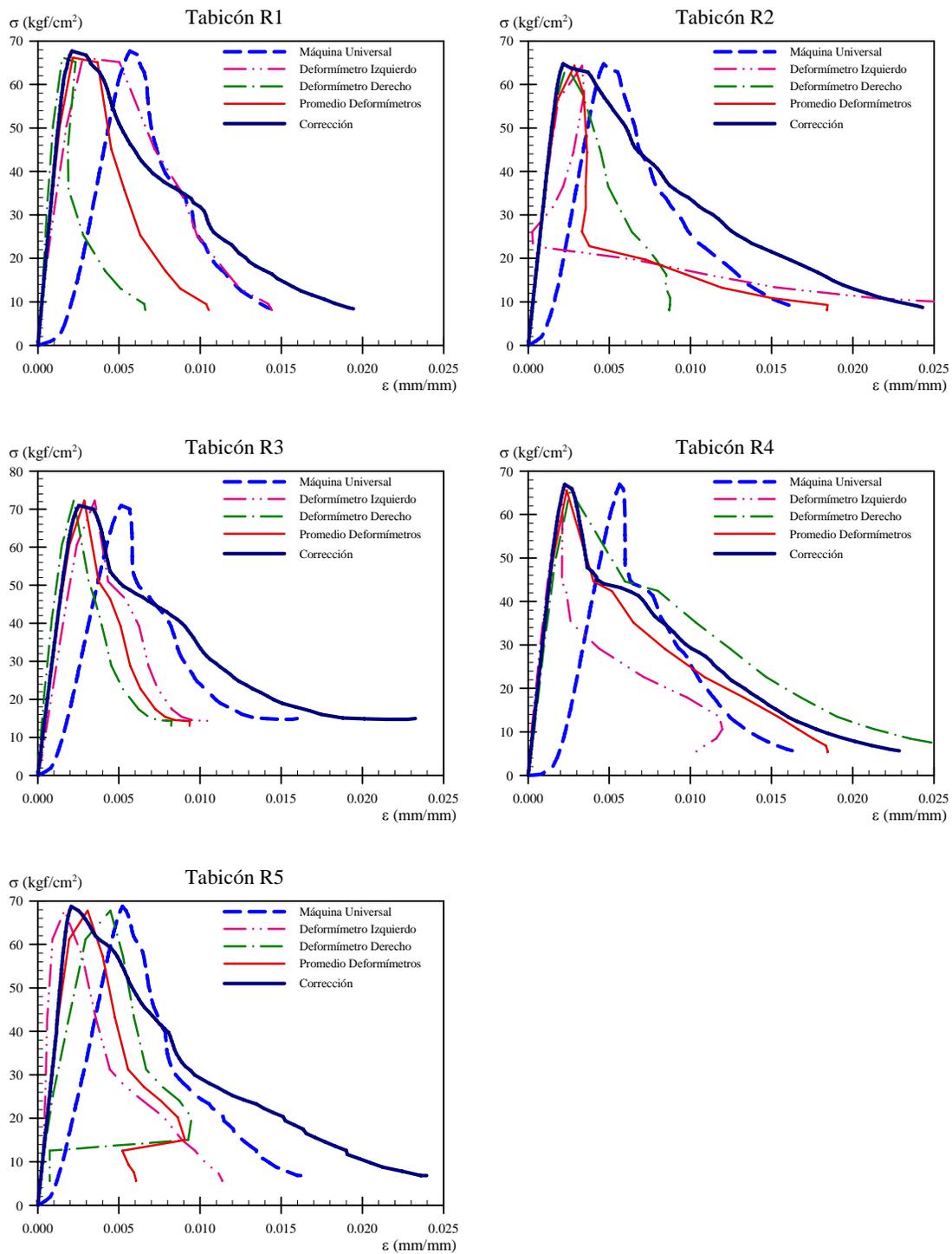


Figura 4.6. Mamposterías de tabicón ensayadas a una velocidad de 0.5333 mm/seg

4.1.6 Resumen de los resultados obtenidos

A continuación se presentan los resultados de los especímenes que fueron considerados para la elaboración de los modelos propuestos (tablas 4.8, 4.9 y 4.10).

Tabla 4.8. Resultados y características de los muretes de ladrillo rojo recocido: 5.50x11.75x23.50

Especímen	Lentos (0.0016 mm/s)					Rápidos (0.5333 mm/s)					
	LRR L1	LRR L2	LRR L3	LRR L4	LRR L5	LRR R1	LRR R2	LRR R3	LRR R4	LRR R5	LRR R6
Fabricado	11/09/09	12-DIC-2008				12-DIC-2008		25-FEB-2009			
Ensayado	22/10/08	19/01/09	21/01/09	23/01/09	28/01/09	02/02/09	02/02/09	06/04/09	06/04/09	06/04/09	20/04/09
Altura (h)	55.3	57.0	56.8	57.2	57.9	57.6	57.6	58.5	58.5	58.3	58.7
Largo (l)	37	36.5	36.5	36.5	36.3	36.4	36.8	36.5	36.7	36.6	36.6
Ancho (t)	11.7	12.0	12.0	12.0	11.7	11.9	12.0	11.5	11.6	11.6	11.8
h/t	4.73	4.75	4.73	4.77	4.96	4.85	4.82	5.09	5.03	5.02	4.99
L_{CAL}	32.5	32.5	34.0	34.2	34.6	34.6	34.6	34.6	34.6	34.6	34.5
Em	10,140	10,730	8,920	12,580	11,410	9,280	10,580	11,380	9,720	9,360	11,410
$f_{m_{exp}}$	45.5	50.6	39.6	51.0	46.9	52.0	53.2	58.7	56.7	52.5	63.5
Fe	1.036	1.038	1.037	1.038	1.048	1.043	1.041	1.055	1.052	1.051	1.049
fm	47	52	41	53	49	54	55	62	60	55	67
ϵ_{fm}	0.0060	0.0061	0.0057	0.0052	0.0050	0.0076	0.0062	0.0060	0.0073	0.0066	0.0067
Em/fm	215	205	217	238	232	171	191	184	163	170	171
$\overline{f_m}$	49					59					
$\overline{\epsilon_{fm}}$	0.0056					0.0067					
$\overline{E_m}$	10,760					10,290					

Tabla 4.9. Resultados y características de los muretes de tabique extruido vertical: 6.00x12.00x24.00

Especímen	Lentos (0.0016 mm/s)				Rápidos (0.5333 mm/s)					
	TEV2H L1	TEV2H L2	TEV2H L3	TEV2H L4	TEV2H R1	TEV2H R2	TEV2H R3	TEV2H R4	TEV2H R5	TEV2H R6
Fabricado	15-DIC-2008				15-DIC-2008		24-FEB-2009			
Ensayado	04/02/09	06/02/09	11/02/09	13/02/09	16/02/09	16/02/09	08/04/09	08/04/09	08/04/09	20/04/09
Altura (h)	56.4	56.5	56.3	56.6	58.5	58.5	56.6	56.6	56.5	56.1
Largo (l)	36.9	36.8	36.9	36.9	37.0	37.0	36.7	36.7	36.8	36.9
Ancho (t)	11.9	11.9	12.0	12.0	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	12.0
h/t	4.73	4.77	4.71	4.74	4.96	4.96	4.79	4.80	4.79	4.68
L_{CAL}	33.9	33.8	33.9	34.0	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
Em	24,890	26,460	26,530	22,330	27,660	30,000	21,250	22,960	23,210	22,850
$f_{m_{EXP}}$	61.7	63.6	63.9	60.1	77.9	87.5	54.1	64.6	59.1	55.9
Fe	1.037	1.038	1.036	1.037	1.048	1.048	1.040	1.040	1.040	1.040
fm	64	66	66	62	82	92	56	67	61	58
ϵ_{fm}	0.0026	0.0023	0.0026	0.0028	0.0029	0.0030	0.0034	0.0033	0.0034	0.0030
Em/fm	389	400	401	358	339	327	378	342	378	395
$\overline{f_m}$	65				70					
$\overline{\epsilon_{fm}}$	0.0026				0.0032					
$\overline{E_m}$	25,050				24,655					

Tabla 4.10. Resultados y características de los muretes de tabicón 7.00x13.00x24.00

Especimen	Lentos (0.0016 mm/s)					Rápidos (0.5333 mm/s)				
	TAB L1	TABL2	TAB L3	TAB L4	TAB L5	TAB R1	TAB R2	TAB R3	TAB R4	TAB R5
Fabricado	02/SEP/09		13/FEB/09			13/FEB/2009				
Ensayado	10/12/08	20/02/09	18/03/09	20/03/09	25/03/09	27/03/09	27/03/09	01/04/09	01/04/09	01/04/09
Altura (h)	62.8	62.8	64.5	64.4	64.4	64.3	64.2	63.9	63.9	64.3
Largo (l)	42.3	42.1	36.8	37.3	36.5	36.7	37.1	37.0	37.0	36.8
Ancho (t)	12.4	12.2	13.1	12.9	12.8	13.0	12.8	13.2	13.2	12.9
h/t	5.05	5.15	4.91	5.00	5.03	4.96	4.96	5.03	4.83	4.98
L _{CAL}	36.8	37.9	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8
Em	25,360	22,560	36,340	34,660	40,360	40,330	34,630	33,690	34,250	34,510
fm _{EXP}	51.3	42.9	51.2	56.2	54.4	67.7	64.7	70.9	66.9	68.7
Fe	1.053	1.058	1.046	1.050	1.052	1.048	1.048	1.051	1.042	1.050
fm	54	45	54	59	57	71	68	75	70	72
ε _{fm}	0.0026	0.0025	0.0019	0.0022	0.0019	0.0021	0.0022	0.0025	0.0023	0.0021
Em/f [*] m	469	497	678	588	706	568	511	452	491	479
$\overline{f_m}$	54					71				
$\overline{\varepsilon_{fm}}$	0.0022					0.0022				
$\overline{E_m}$	31,860					35,480				

En dichas tablas la notación utilizada fue la siguiente:

Unidades de longitud en cm.

Unidades de resistencia en kgf/cm².

Las alturas incluyen el cabeceo.

L_{CAL} = Longitud a través de la cual se realizaron las mediciones en la parte central de los especímenes.

Em = Módulo de elasticidad de la mampostería.

fm_{EXP} = Resistencia nominal a la compresión de la mampostería, obtenido directamente de la prueba.

Fe = Factor de corrección por esbeltez, según NTCM-2004 del RCDF.

fm = Resistencia nominal a la compresión de la mampostería, corregido por factor de esbeltez.

ε_{fm} = Deformación unitaria relacionada a fm.

$\overline{f_m}$ = Resistencia nominal promedio a la compresión.

$\overline{\varepsilon_{fm}}$ = Deformación promedio asociada al esfuerzo máximo.

$\overline{E_m}$ = Módulo de elasticidad promedio.

4.2 MODELOS PROPUESTOS PARA LAS MAMPOSTERÍAS EN ESTUDIO

A partir de los datos experimentales se construyeron modelos, los cuales fueron ajustados a una parábola de 2do orden para la rama ascendente y a líneas rectas para la rama descendente y esfuerzo residual. El ajuste se realizó para un modelo en el que los esfuerzos estén normalizados. En la figura 4.7, se aprecia la forma del modelo y los parámetros que lo definen.

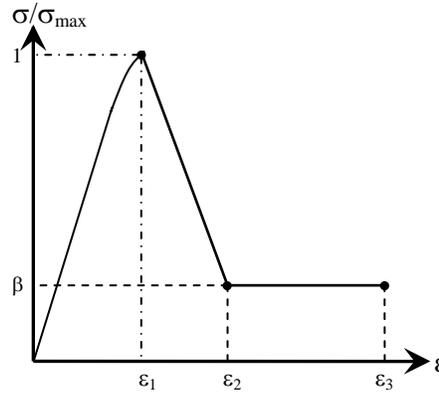


Figura 4.7. Modelo propuesto

Las expresiones que definen la rama ascendente y descendente son las siguientes:

Rama ascendente ($0 < \varepsilon < \varepsilon_1$):

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1^2} - \frac{\alpha}{\varepsilon_1} \right) \varepsilon^2 + \alpha \varepsilon \quad (1)$$

Rama descendente ($\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$):

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = 1 + \frac{\beta - 1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} (\varepsilon - \varepsilon_1) \quad (2)$$

Rama descendente ($\varepsilon > \varepsilon_2$):

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \beta \quad (3)$$

donde ε es la deformación unitaria de interés, ε_1 es la deformación asociada al esfuerzo máximo, ε_2 es la deformación asociada al inicio del esfuerzo residual, α es la relación E_m/f'_m y β es el esfuerzo residual.

El parámetro ε_1 fue obtenido del promedio de los valores experimentales o corregidos en algunos casos, los parámetros α , β y ε_2 se obtuvieron a partir de un ajuste estadístico que minimizó el error logarítmico entre la curva modelo y los resultados experimentales.

Se optó por utilizar este modelo por la simplicidad que tiene en cuanto a sus variables empleadas.

Para el caso de las mamposterías en estudio se observó que la ecuación de una parábola de 2do grado se ajusta razonablemente a la rama ascendente de las curvas, siendo la variable α la que define la curvatura de la curva. La rama descendente se modeló mediante dos líneas rectas conforme lo observado en los resultados experimentales con base en cinco o seis muestras para cada tipo de pieza estudiado.

En la tabla 4.11, se definen los valores de los parámetros obtenidos para los modelos en estudio.

Tabla 4.11. Parámetros que definen los modelos

Tipo de mampostería	Velocidad									
	0.0016 mm/seg					0.5333 mm/seg				
	α	β	ε_1	ε_2	ε_3	α	β	ε_1	ε_2	ε_3
LRR	243	0.11	0.0055	0.0151	0.025	199	0.086	0.0067	0.0158	0.025
TEV2H	446	0.069	0.0026	0.0076	0.025	398	0.029	0.0032	0.0081	0.025
Tabicón	652	0.263	0.0022	0.0173	0.025	558	0.175	0.0022	0.0157	0.025

En las figuras 4.8 a 4.13, se muestran las curvas esfuerzo-deformación ya corregidas, además de su modelo ajustado a los parámetros de la tabla 4.11.

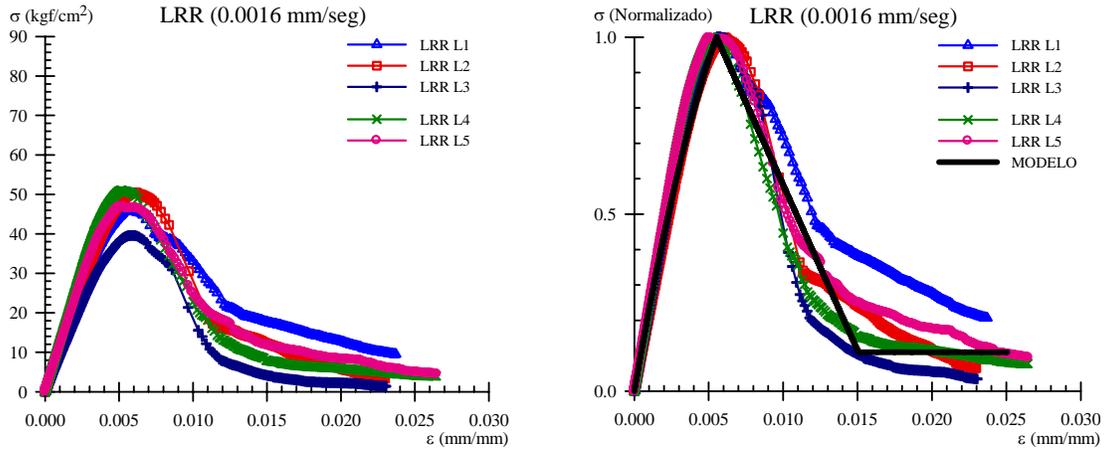


Figura 4.8. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de ladrillo rojo recocido

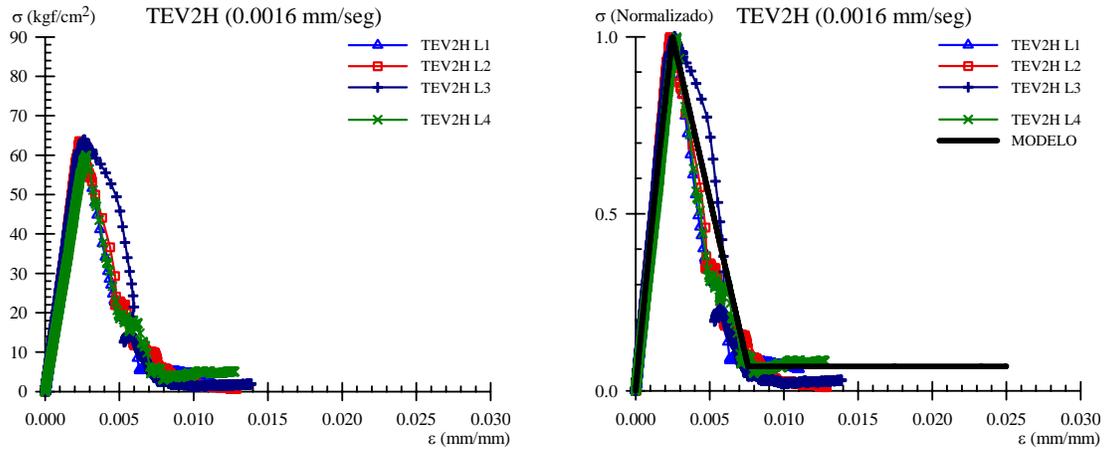


Figura 4.9. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de tabique extruido

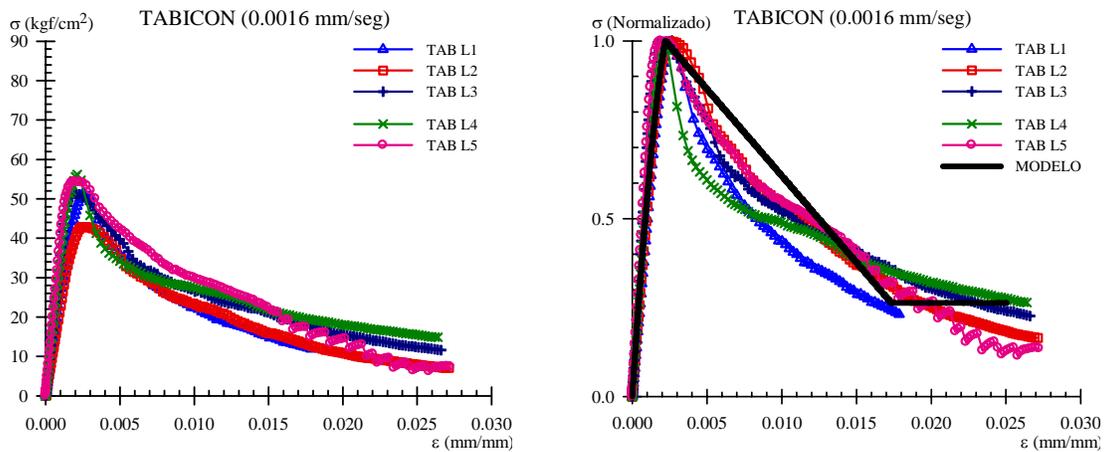


Figura 4.10. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de tabicón

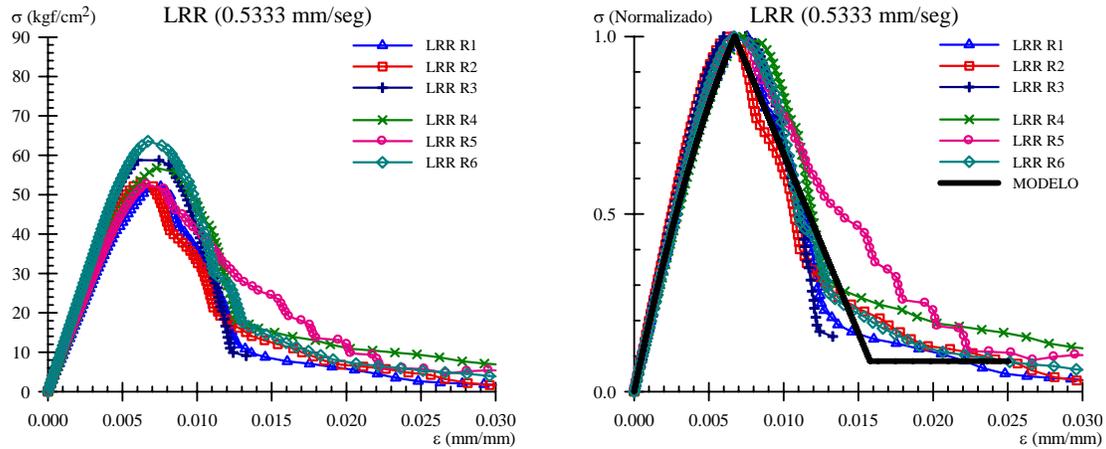


Figura 4.11. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de ladrillo rojo recocido

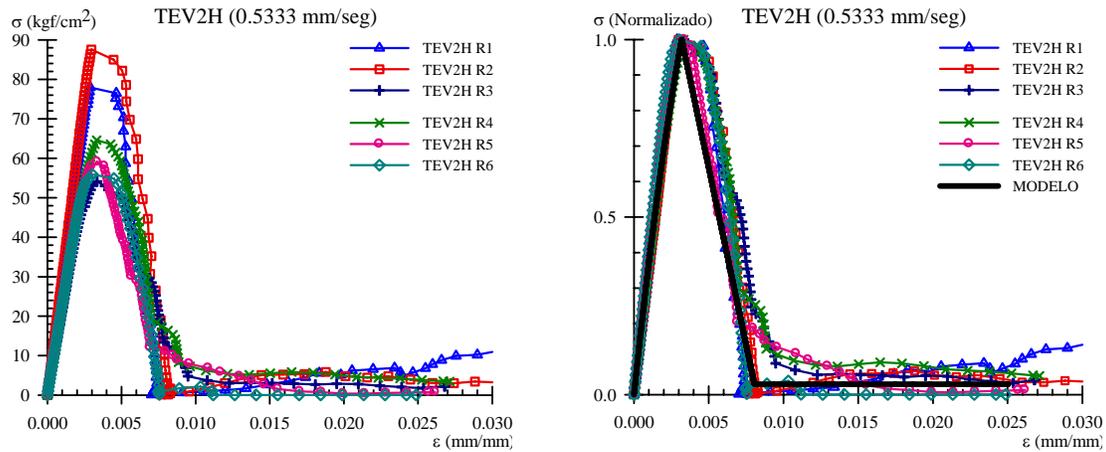


Figura 4.12. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de tabique extruido

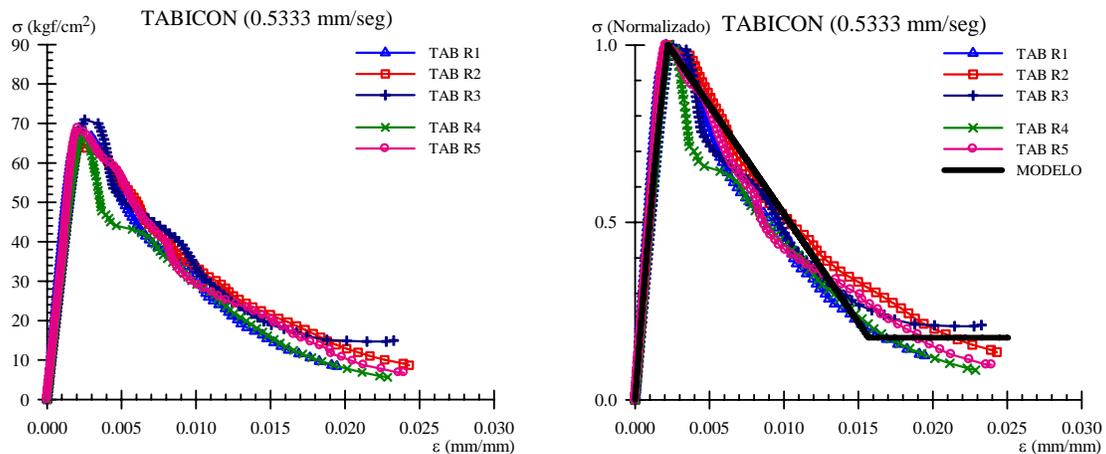


Figura 4.13. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los muretes de tabicón

CAPÍTULO 5

APLICACIONES

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS APLICACIONES

Se presentan tres aplicaciones que involucran la participación de los modelos de comportamiento axial estudiados.

En la primera aplicación se utilizan los modelos esfuerzo-deformación axial propuestos para una velocidad de carga rápida (0.5333 mm/seg), para el cálculo de diagramas momento-curvatura de un muro esbelto de planta baja de estructuras diseñadas según las NTCM-2004 del RCDF.

La segunda aplicación consiste en una estimación simplificada de la deformación unitaria requerida para que un muro de mampostería logre desarrollar la ductilidad de desplazamiento global supuesta en las NTCM-2004.

Finalmente, la tercera aplicación consiste en el uso de los modelos esfuerzo-deformación axial durante la elaboración de un modelo de análisis no-lineal de un edificio de mampostería de 6 niveles con refuerzo interior diseñado conforme las NTCM-2004.

5.2 APLICACIÓN 1: DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA

En la figura 5.1 se muestran las características de los muros estudiados. La geometría de los elementos corresponde a muros esbeltos pertenecientes a la estructura analizada en la tercera aplicación, mientras que el refuerzo vertical fue obtenido mediante los resultados del análisis conforme las NTCM-2004 de dicha estructura.

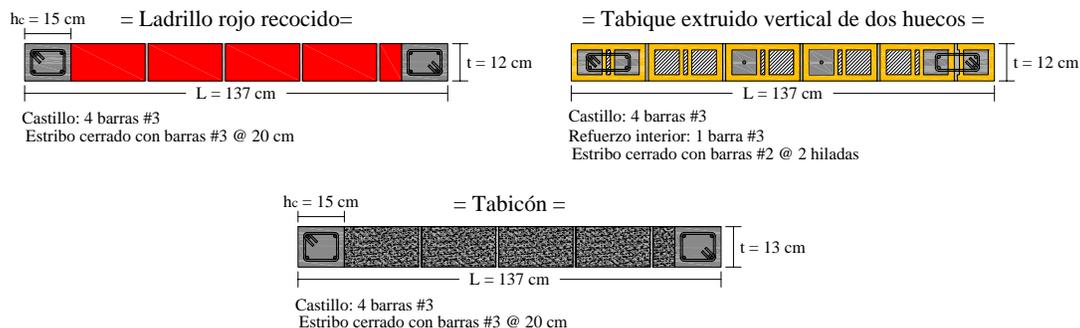


Figura 5.1. Características de los muros

Para cada muro se calcularon diagramas momento-curvatura para tres niveles de carga axial (0, 0.05 y 0.10 veces el valor de la resistencia de diseño del muro a carga vertical). Además, se hace una comparación aplicando los datos de las tablas y las curvas esfuerzo-deformación

obtenidos por Meli y Hernández (1971), y considerando que la curva esfuerzo-deformación es lineal la hasta la falla para una deformación unitaria de 0.003 como lo establecen las NTCM-2004 del RCDF, ver figura 5.2.

Los diagramas momento-curvatura, se muestran hasta el comienzo del esfuerzo residual (ϵ_2) cuando se emplearon las curvas esfuerzo-deformación de los modelos propuestos, hasta el esfuerzo máximo para el caso de las curvas esfuerzo-deformación de Meli-Hernández (1971) y cuando la deformación unitaria es de 0.003 para el caso de las curvas esfuerzo-deformación consideradas conforme a las NTCM-2004.

Para los cálculos se consideró un \bar{f}_m de 59 kg/cm², 70 kg/cm² y 70 kg/cm², para la mampostería de tabique rojo recocido, tabicón y tabique extruido, respectivamente. Para el acero de refuerzo se consideró el modelo propuesto por Rodríguez y Botero (1995) para aceros de refuerzo mexicanos, ver figura 5.2.

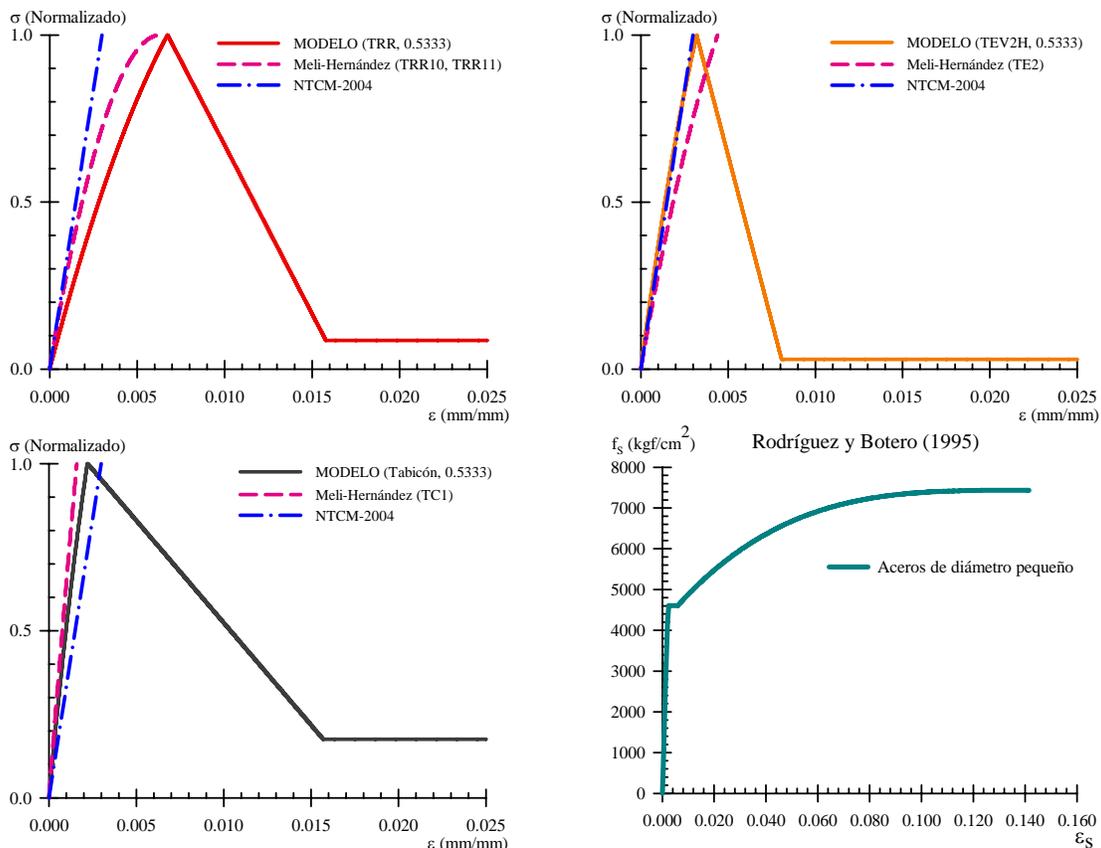
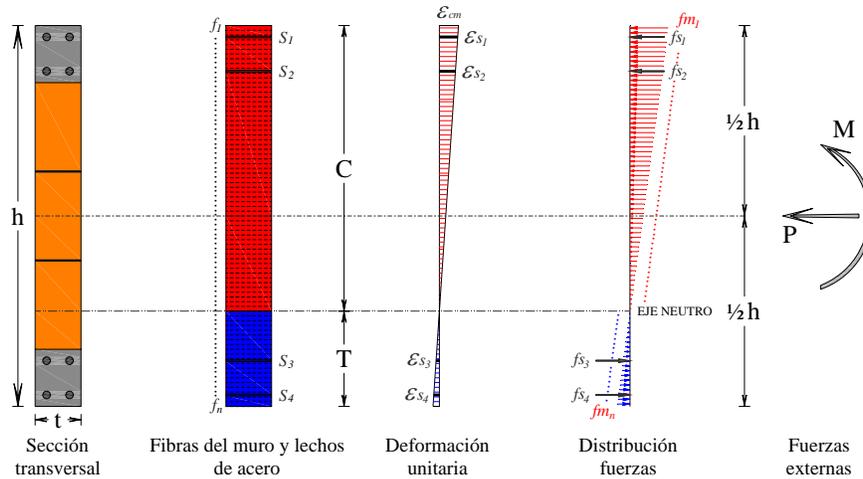


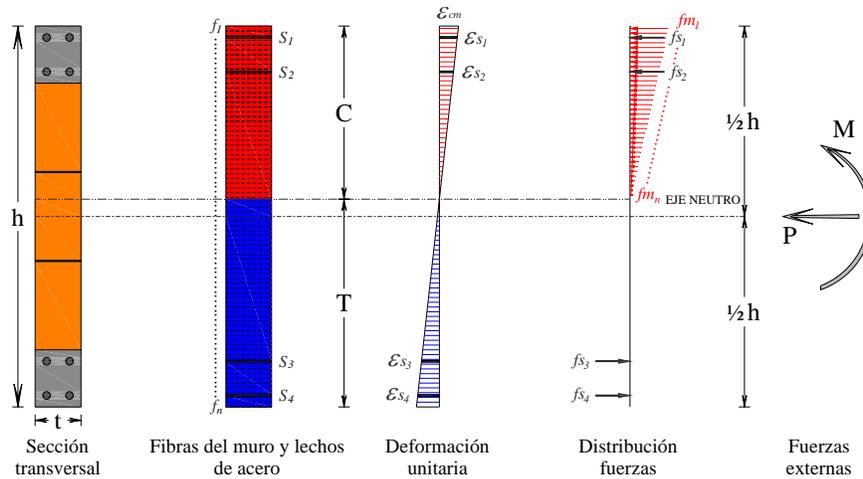
Figura 5.2. Curvas esfuerzo-deformación

Para determinar los diagramas momento-curvatura asociados a distintos niveles de carga axial en todos lo ejemplos se discretizó la sección trasversal del muro en una serie de fibras. Se consideró el acero de refuerzo longitudinal colocado en los castillos así como el refuerzo interior colocado en el muro tanto las fibras como los lechos de acero de refuerzo se orientaron como se muestra en la figura 5.3. Se consideró el área de la sección transversal del muro puramente de mampostería.

En el cálculo de los diagramas se consideró que la mampostería resiste una tensión igual a un 10% la resistencia a compresión como en el concreto simple y se consideró que el módulo de elasticidad de la mampostería a tensión es el mismo que el de la mampostería a compresión. Sin embargo, para que esta resistencia sea considerada en las fibras del muro que experimentan tensión, el esfuerzo de tensión no debe superar la resistencia a la tensión de lo contrario las fibras se consideran agrietadas (figura 5.3b).



a) Sección antes del agrietamiento a tensión



b) Sección después del agrietamiento a tensión

Figura 5.3. Determinación teórica momento-curvatura

El diagrama momento-curvatura para un cierto nivel de carga axial se obtuvo incrementando la deformación axial de la mampostería en la fibra extrema a compresión, ϵ_{cm} . Para cada valor de ϵ_{cm} se encontró la profundidad del eje neutro C que satisface la ecuación del equilibrio de fuerzas, ver ecuación (5.1).

$$P_r = \sum_{i=1}^{nf} f m_i \times A m_i + \sum_{i=1}^{ns} f s_i \times A s_i \quad (5.1)$$

en donde P_r es la carga axial aplicada sobre el muro, $f m_i$, $f s_i$ son el esfuerzo en la mampostería y en el acero en la i -ésima fibra y lecho respectivamente, $A m_i$ y $A s_i$ son la área de la mampostería y del acero en la i -ésima fibra y lecho respectivamente, n_f y n_l son el número de fibras de mampostería y número de lechos de acero respectivamente.

Para estimar los esfuerzos que las fibras de mampostería y los lechos de acero experimentan, es necesario conocer las curvas esfuerzo-deformación de dichos materiales, ya que a partir de las deformaciones unitarias de las fibras y de los lechos se asocia un esfuerzo correspondiente el cual se utiliza para verificar la condición de equilibrio de la ecuación (5.1).

Una vez que la condición de equilibrio de la ecuación (5.1) se cumple dentro de una tolerancia aceptable, se calculó el momento que resiste la sección tomando momentos de las fuerzas alrededor del eje neutro plástico, ver ecuación (5.2).

$$M_r = \sum_{i=1}^{nf} f m_i \times A m_i \times d m_i + \sum_{i=1}^{ns} f s_i \times A s_i \times d s_i \quad (5.2)$$

en donde $d m_i$, $d s_i$ son la distancia del centroide de la i -ésima fibra y lecho respectivamente al eje neutro plástico. $f m_i$, $f s_i$, $A m_i$ y $A s_i$, ya fueron definidas.

La curvatura correspondiente se calcula con la ecuación (5.3).

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cm}}{C} \quad (5.3)$$

Los diagramas momento-curvatura obtenidos se muestran en las figuras 5.4 a 5.6, en todos los casos se observa como el incremento de carga axial ocasiona que los muros tengan una mayor resistencia a flexión, sin embargo conforme este nivel se incrementa la capacidad para acomodar deformación se ve reducida.

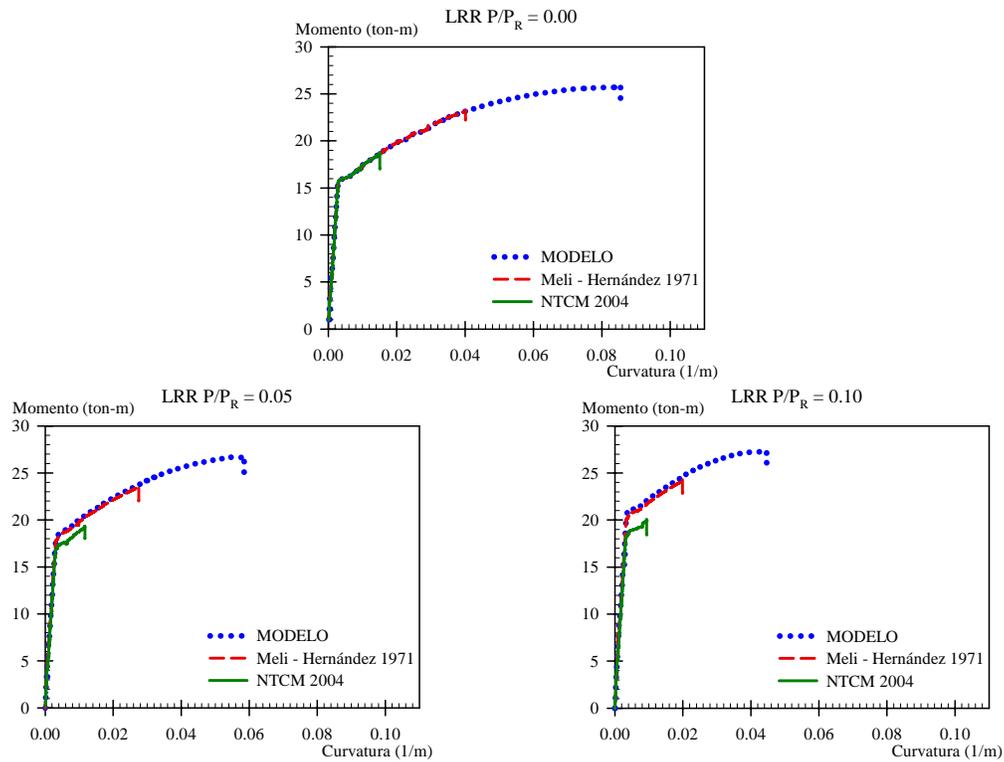


Figura 5.4. Diagramas momento-curvatura para el muro de ladrillo rojo recocido

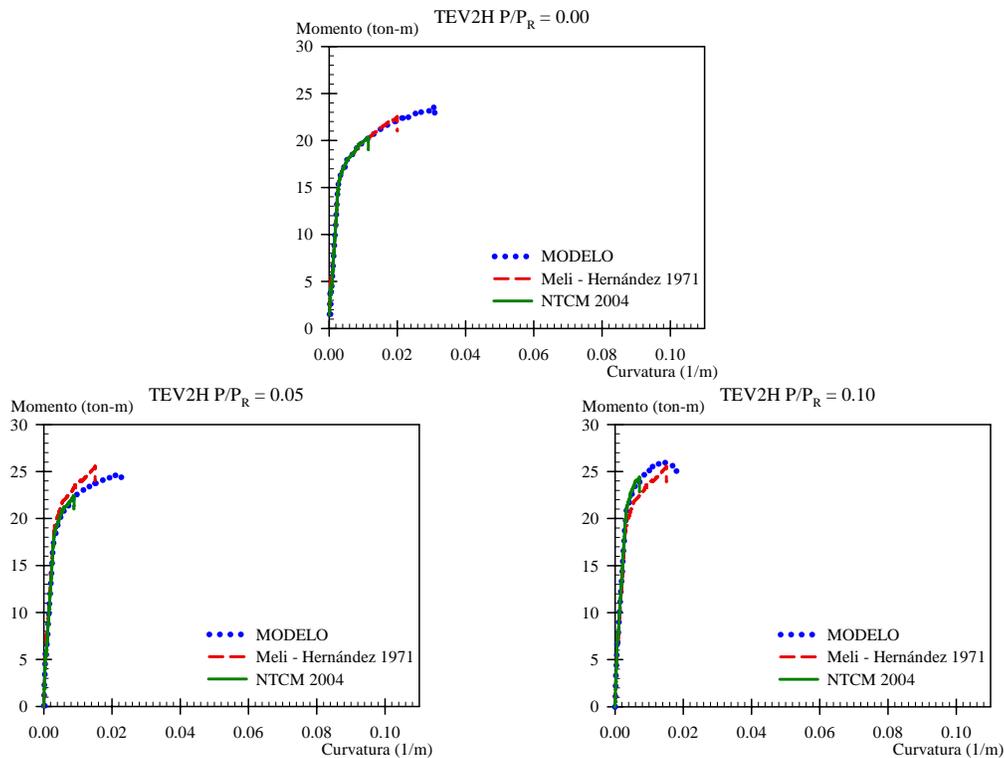


Figura 5.5. Diagramas momento-curvatura para los muros de tabique extruido

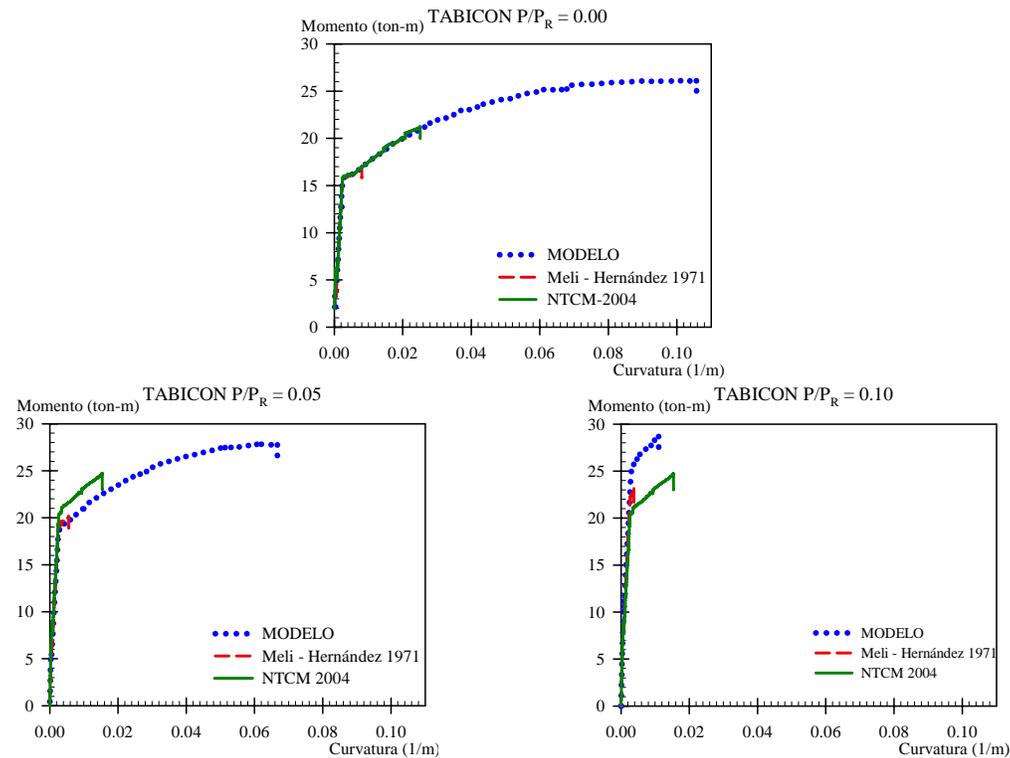


Figura 5.6. Diagramas momento-curvatura para el muro de tabicón

Como puede observarse en las figuras 5.4 a 5.6 el uso de los modelos desarrollados conduce a estimaciones de la capacidad de deformación mayores respecto a los otros modelos considerados, especialmente para niveles de carga axial menores a 0.05 veces la carga vertical resistente. Por lo tanto puede considerarse que el uso de los modelos simplificados conduce a estimaciones conservadoras de la capacidad de deformación de muros que se comportan fundamentalmente a flexión.

5.3 APLICACIÓN 2: ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA REQUERIDA EN MUROS ESBELTOS PARA ALCANZAR CIERTO NIVEL DE DUCTILIDAD GLOBAL

Considere el muro esbelto de piezas de tabique extruido de seis niveles mostrado en la figura 5.1, el cual pertenece a la planta baja de la estructura analizada en la tercera aplicación (el muro se identifica con el número 6 y se ubica en la dirección larga sobre el eje C conforme a la figura 5.7). Mediante ciertas consideraciones es posible estimar en forma aproximada la deformación unitaria demandada en la zona de compresión del muro cuando este se deforma a una ductilidad global dada. En este estudio la demanda de ductilidad global se define como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia en la parte superior del muro.

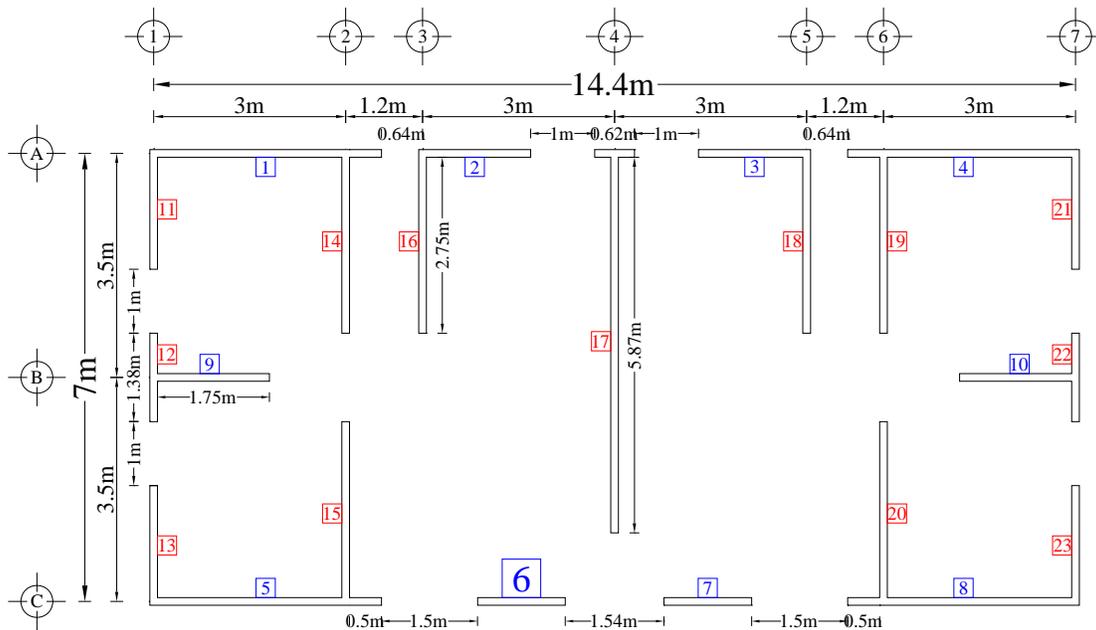


Figura 5.7. Planta tipo

Suponiendo que el muro está desplantado en una base rígida, que se forma una articulación plástica a momento en la base del muro con comportamiento elastoplástico-perfecto y que la posición del eje neutro es constante en la altura del muro, la curvatura asociada a cierta ductilidad global se estima conforme la ecuación (5.4). Dicha ecuación aparece en las normas neozelandesas (NZS 4230-2004) como una estimación conservadora para asegurar que los muros de mampostería desarrollen una ductilidad adecuada. Priestley y Elder (1982) presentaron esta expresión a partir del estudio de muros de mampostería en cantiliver por lo que se ignora la interacción de las losas y de los muros existentes en la dirección de análisis.

$$\varphi_u = \varphi_y \left[\frac{A_e(Q-1)}{1.5 \left(1 - \frac{1}{4A_e} \right)} + 1 \right] \quad (5.4)$$

$$A_e = \frac{h_e}{L} \quad (5.5)$$

En la ecuación (5.4) φ_y es la curvatura de fluencia del muro, A_e es la relación de esbeltez efectiva del muro, h_e es la altura efectiva del centroide de la fuerza lateral a partir de la base, L es la longitud del muro y Q es la ductilidad global requerida (figura 5.8).

En dicha expresión se supone que el comportamiento del muro está completamente regido por flexión y que no presenta falla por corte en ningún nivel, para ello el muro debe estar bien reforzado con barras de acero colocadas vertical y horizontalmente.

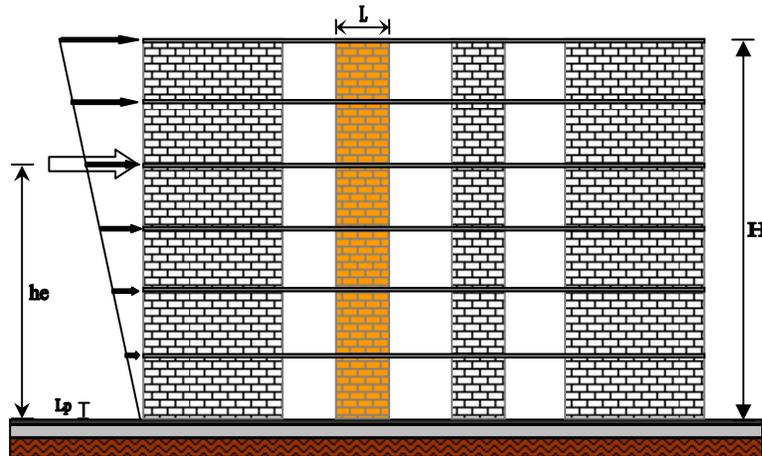


Figura 5.8. Muro en estudio, sobre base rígida

Considerando el armado del muro de tabique extruido mostrado en la figura 5.1 y con las cuantías de 0.0009 y 0.0014 para el refuerzo vertical y horizontal respectivamente, empleando la ecuación (5.4) se tiene que para que el muro pueda desarrollar una ductilidad global $Q=1.5$ se requiere una curvatura igual a 0.0136. De los cálculos del diagrama momento-curvatura mostrado en la figura 5.9 se tiene que para este nivel de curvatura la deformación unitaria requerida sería igual a 0.013. Cabe aclarar que el diagrama momento-curvatura fue calculado para la carga axial originada por la carga gravitacional de la estructura analizada en la tercera aplicación y con las mismas consideraciones que los diagramas mostrados en las figuras 5.4 a 5.6.

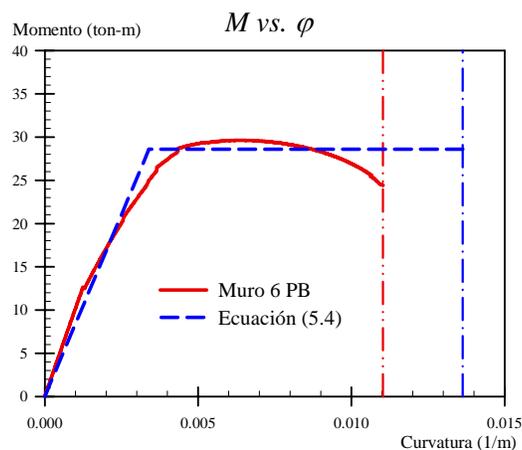


Figura 5.9. Comparación de los diagramas momento-curvatura

Conforme al modelo esfuerzo-deformación propuesto para mampostería de piezas extruidas se tiene que para que el muro desarrolle la curvatura requerida se requiere de una deformación unitaria mayor a la cual se alcanza el esfuerzo residual. Por lo tanto podría considerarse que el estado de la mampostería asociado a tal curvatura se muestra en la figura 5.10, el cual corresponde a una deformación unitaria de 0.010 mm/mm, debido a que no se cuentan con imágenes asociadas a la deformación unitaria de 0.013 mm/mm.

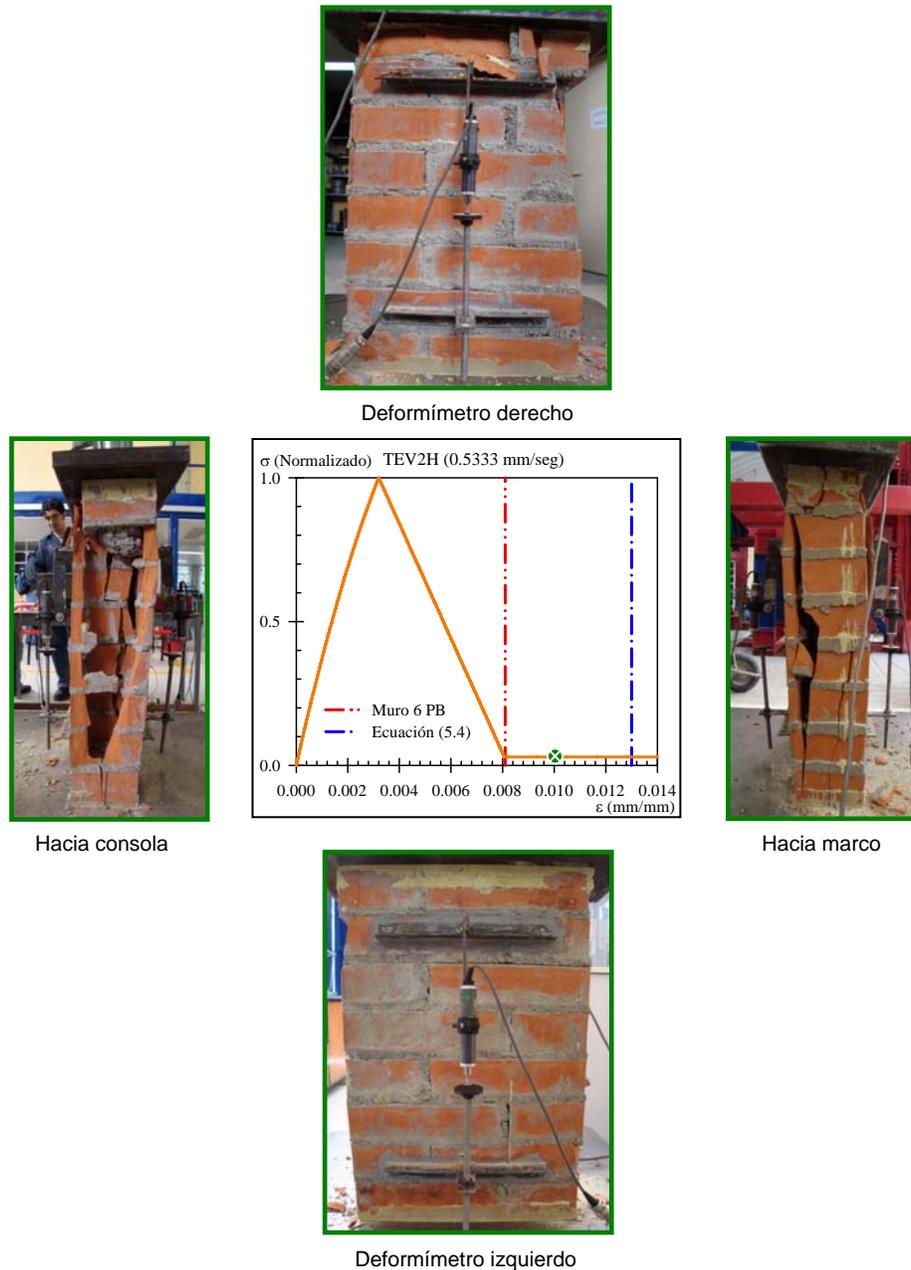


Figura 5.10. Estado de la mampostería cuando $\varepsilon = 0.010$ mm/mm

Esto sugiere que en estructuras altas, para que los muros esbeltos desarrollen un comportamiento no lineal a flexión asociado a una demanda de ductilidad de desplazamiento del orden de 1.5, las deformaciones unitarias que tendrían que experimentar las zonas a compresión de los muros estarían en la parte descendente de la curva esfuerzo-deformación. Lo cual implica que sería posible que se observaran fallas frágiles y explosivas como la mostrada en la figura 5.10.

5.4 APLICACIÓN 3: ANÁLISIS NO-LINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA DE 6 NIVELES

La aplicación expuesta anteriormente es una manera sencilla de obtener el estado de la mampostería asociada a una ductilidad específica. Un análisis más refinado puede realizarse mediante el método descrito en Terán, Arroyo y Ruiz (2009) y en Valenzuela (2010) para estructuras de varios niveles. Dicho método consiste en realizar un análisis estático no lineal de la estructura mediante el modelo de la analogía de columna ancha. Para esto se emplea un modelo modificado de la columna ancha en donde se considera simultáneamente el comportamiento no lineal a flexión y corte.

El comportamiento no lineal a flexión se modela mediante un resorte a giro en la base del muro y el comportamiento no lineal a corte se modela mediante un resorte a desplazamiento colocado en la mitad de la altura del muro en cada entrepiso. Esta metodología ha sido aplicada por Valenzuela (2010), para estudiar los factores de sobrerresistencia en estructuras de mampostería confinada. Aunque es una propuesta razonable se tiene la limitante de no contar con suficiente evidencia experimental sobre el comportamiento de muros esbeltos sujetos a corte, además el modelo no lineal no considera efectos de torsión. Sin embargo, se decidió presentar un ejemplo para el caso de mampostería extruida con refuerzo interior.

La vista en planta de la estructura considerada se muestra en la figura 5.11, la configuración se mantiene constante en los 6 niveles de la estructura. Una vista del modelo en 3D se muestra en la figura 5.12. El periodo elástico estimado fue de 0.61 y 0.56 en la dirección corta y larga respectivamente. Las distorsiones del diseño elástico se muestran en la figura 5.13.

Los muros de la estructura se diseñaron acorde a la modalidad de mampostería reforzada interiormente para resistir cargas verticales y horizontales conforme lo establecen las NTCM-2004 del RCDF. Los elementos mecánicos de diseño se obtuvieron a partir de un análisis dinámico modal-espectral conforme al apéndice A de las NTCS-2004 del RCDF, realizando un modelo en tres dimensiones de la estructura a través de la analogía de la columna ancha (figura 5.12). La estructura se supuso ubicada en la zona de Lomas del Distrito Federal y se utilizó un factor de comportamiento sísmico $Q=1.5$. Para el diseño por cargas verticales se supuso una carga uniforme de 0.8 ton/m^2 en todos los niveles.

Cabe mencionar que inicialmente la estructura se ubicó en la zona del Lago del Distrito Federal, sin embargo, con las dimensiones de la piezas disponibles comercialmente no fue posible que algunos muros de planta baja cubrieran las demandas por corte al presentarse cargas de tensión, por esta razón se decidió cambiar la ubicación de la estructura.

En la figura 5.11, las celdas con relleno sólido son las celdas en las que ubicó el refuerzo vertical, el cual consistió en cuatro barras del número 3 distribuidas en dos barras sobre dos celdas consecutivas para el caso de los castillos extremos e intermedios (muro17), el refuerzo interior de las celdas intermedias consiste en una barra del número 3, la separación de este refuerzo no excede la que se especifica en las NTCM-2004. En todos los muros se buscó tener una simetría con respecto a la colocación del refuerzo vertical.

En lo referente al refuerzo horizontal, todos los muros de la estructura fueron diseñados con dos alambres de 5/32" de diámetro con un $f_y=6,000 \text{ kg/cm}^2$, los cuales se colocaron a cada tres hiladas (21 cm). Las cuantías de refuerzo vertical, ρ_v , y horizontal, ρ_h , que se emplearon en todos los muros fueron de 0.0009 y 0.0014, respectivamente. El factor de eficiencia del refuerzo horizontal, η , es de 0.6.

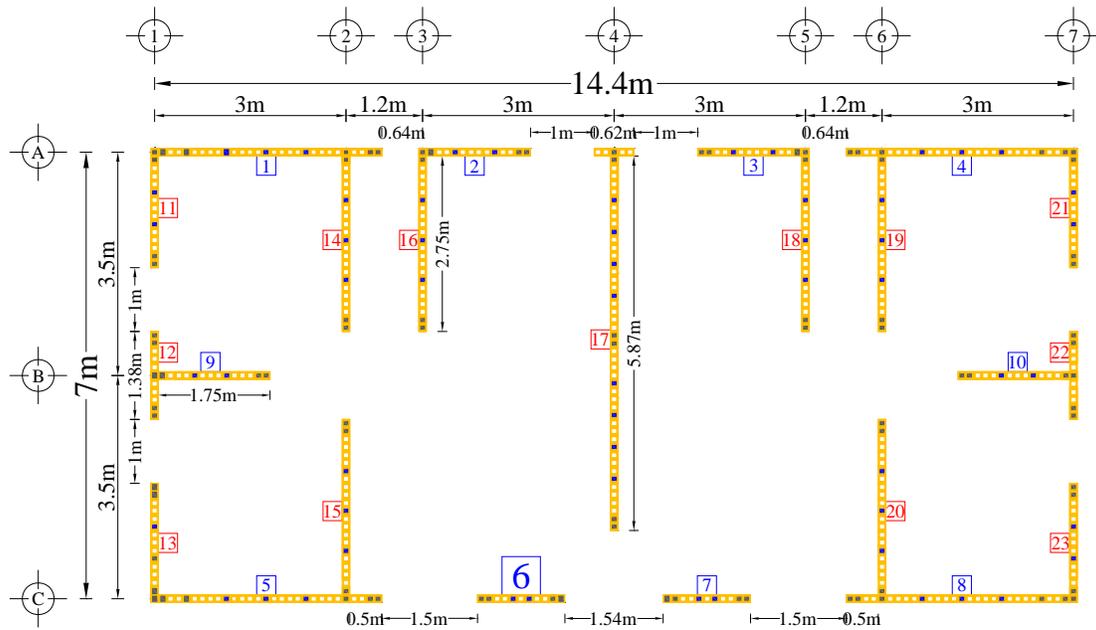


Figura 5.11. Planta tipo de la estructura de seis niveles considerada en el análisis

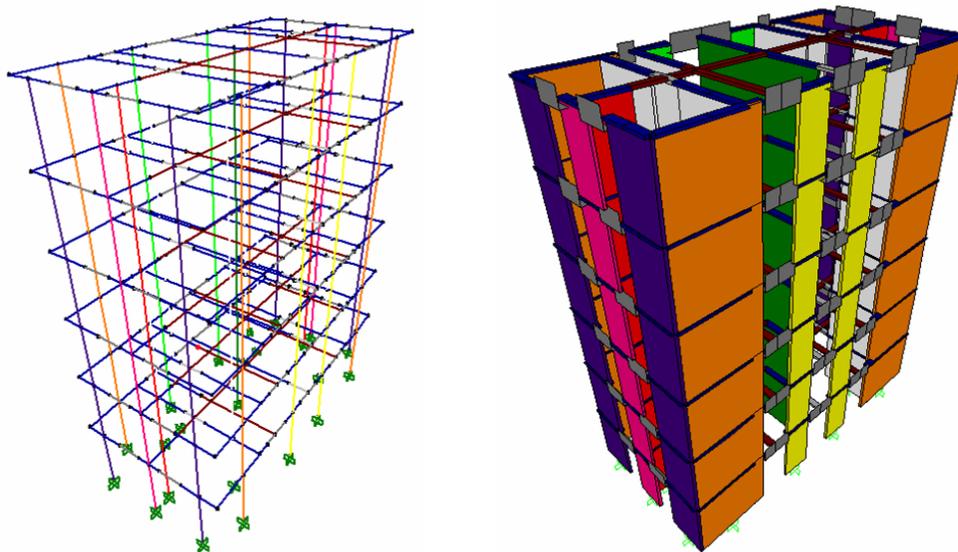


Figura 5.12. Modelado de la estructura en 3D

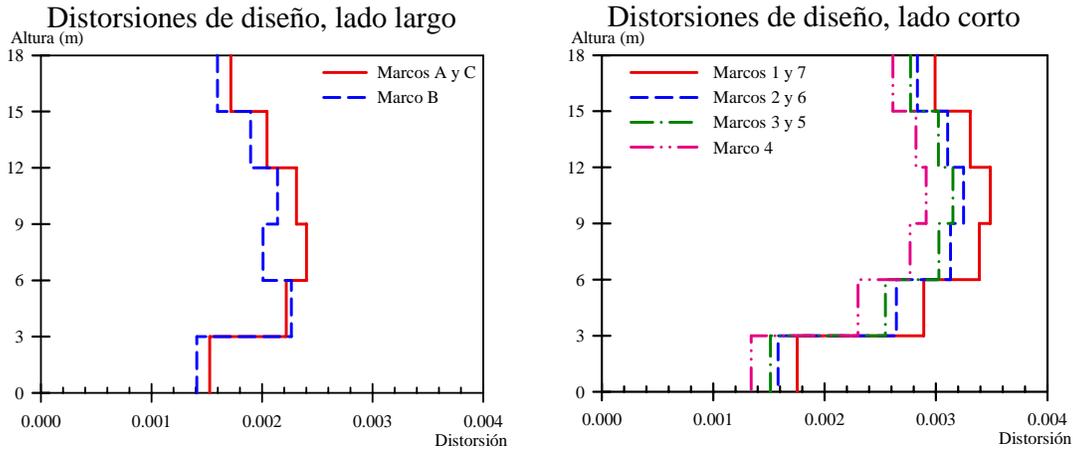


Figura 5.13. Distorsiones de diseño

Conforme al procedimiento descrito en Terán, Arroyo y Ruiz (2009) y en Valenzuela (2010) se construyó el modelo no-lineal del edificio. Dicho modelo se sujeto a un patrón de cargas laterales con una variación proporcional al primer modo de vibración y se realizó un análisis ante carga monotónicamente creciente.

La idealización del modelo modificado de la columna ancha para varios pisos que considera simultáneamente comportamiento no lineal a flexión y a corte se muestra en la figura 5.14.

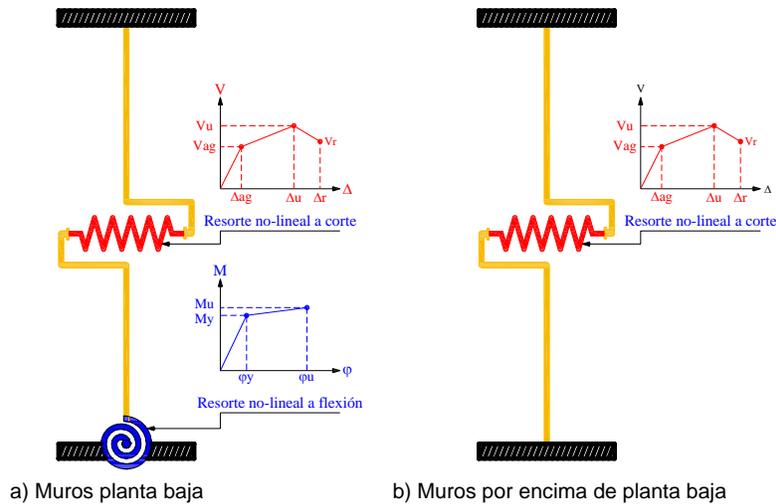


Figura 5.14. Modelo modificado de la columna ancha

Los parámetros que definen el comportamiento no lineal a flexión se obtienen de los diagramas momento curvatura de los muros de planta baja de la estructura y son M_y , M_u , ϕ_y y ϕ_u , es decir, el momento de fluencia, el momento resistente máximo, la curvatura de fluencia y la curvatura asociada al momento resistente máximo.

Los parámetros que definen el comportamiento no lineal acorte se obtienen a partir de ensayar muros ante carga lateral y son V_{ag} , V_u , V_r , Δ_{ag} , Δ_u y Δ_r , es decir, el cortante al inicio

del agrietamiento, el cortante resistente máximo, el cortante residual, el desplazamiento asociado al inicio del agrietamiento, el desplazamiento asociado a la resistencia máxima y el desplazamiento asociado a la resistencia residual.

En México solo la mampostería confinada con y sin refuerzo horizontal cuenta con expresiones que definen todo el comportamiento a corte (Flores y Alcocer, 1995). Debido a la falta de estudios experimentales en nuestro país que definan el comportamiento a corte de muros de mampostería reforzada interiormente, V_u y V_r , se estimaron conforme al modelo de Voon (2007) para una ductilidad de desplazamiento de 1.5. Aunque el modelo no fue desarrollado para las mamposterías mexicanas este se empleó porque considera la relación de aspecto del muro y la degradación en la resistencia cortante producida por las demandas cíclicas de desplazamiento, recordemos que en México la mayoría de los ensayos realizados sobre muros de mampostería ante carga lateral tienen una relación de aspecto de uno (muros de 2m de largo x 2 m de alto).

Los valores de Δ_u y Δ_r se estimaron tomando como base los valores propuestos en los modelos de Flores y Alcocer (1995), los cuales fueron modificados para el caso de muros esbeltos por Valenzuela (2010). Los valores obtenidos son una aproximación que toma en cuenta el efecto de la relación de aspecto en la capacidad de deformación a partir de una interpolación lineal usando el promedio de los datos experimentales para muros de mampostería confinada recopilados por Aztroza y Schmidt (2004).

Los valores de V_{ag} corresponden a la resistencia a corte de diseño según las NTCM-2004 del RCDF. Los valores de Δ_{ag} se obtienen a partir de Flores y Alcocer (1995).

En la figura 5.15, se indica como fueron ubicadas las articulaciones que definen los comportamientos a flexión y a corte para realizar el análisis estático no lineal.

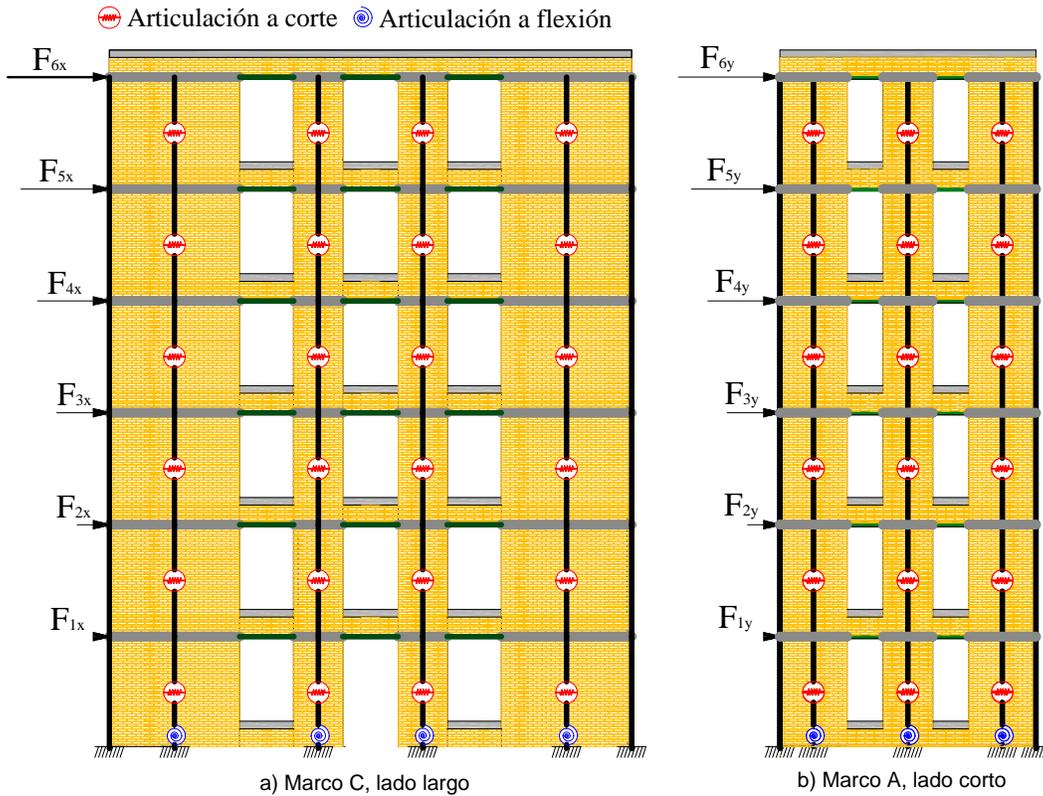


Figura 5.15. Ubicación de las articulaciones en la estructura

En la figura 5.16 se muestra la curva cortante basal contra desplazamiento obtenida del análisis, mientras que en las figuras 5.17 y 5.18 se muestra la evolución de las distorsiones de entrepiso y el mecanismo de falla observado respectivamente.

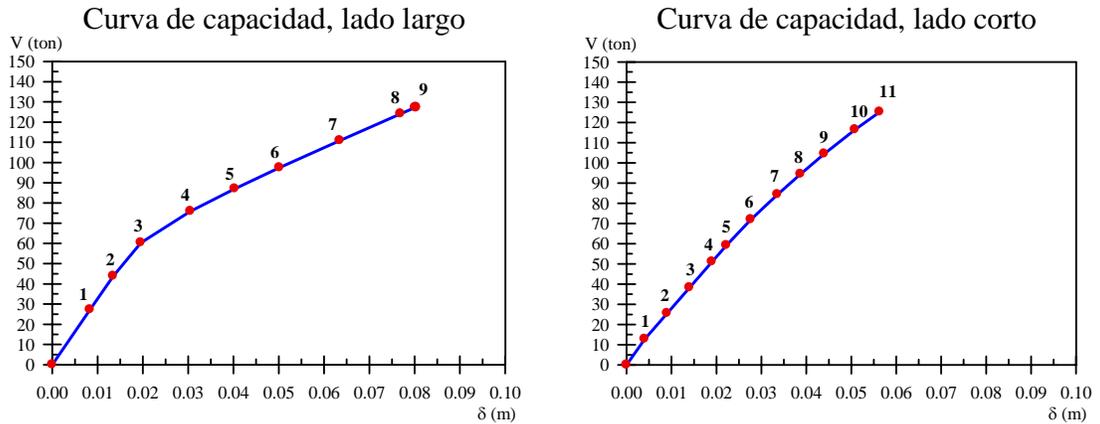


Figura 5.16. Cortante basal vs. Desplazamiento de azotea

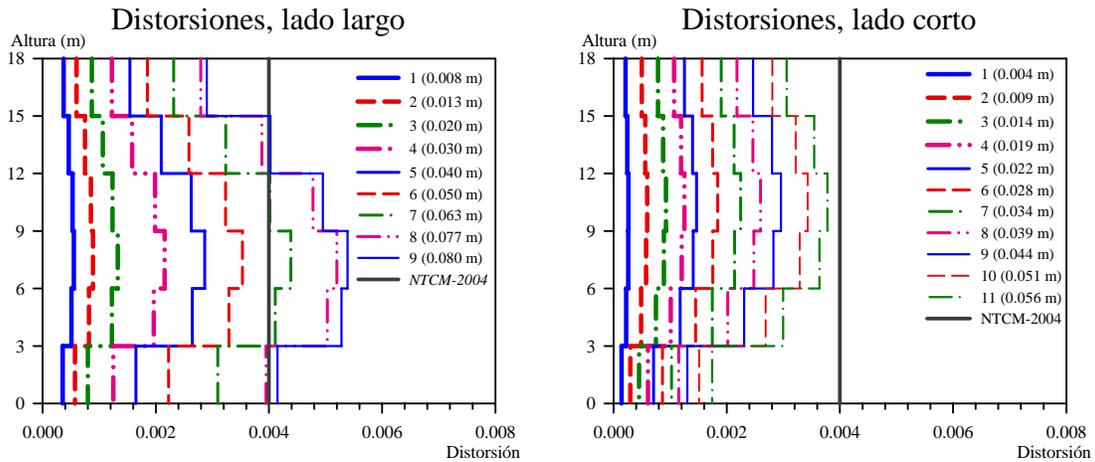


Figura 5.17. Distorsiones del análisis estático no lineal

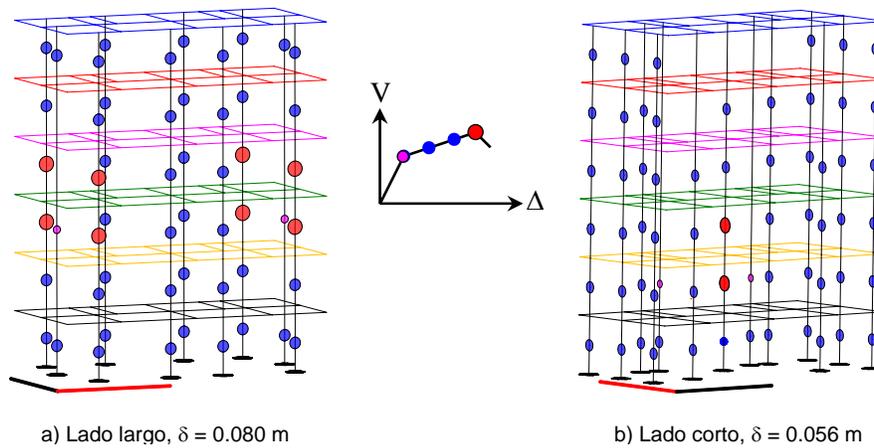


Figura 5.18. Mecanismo de falla

En base al cortante basal de diseño de 35.548 ton para ambos lados y de los resultados mostrados en la figura 5.16 ($V_u = 127.178$ ton y $V_u = 125.239$ ton, lado largo y lado corto) se estima que la estructura analizada tiene un factor de sobrerresistencia de 3.57 y 3.52 para el lado largo y lado corto respectivamente. Además, ajustando una idealización bilineal a las curvas mostradas en la figura 5.16 se estima una capacidad de ductilidad global de 2.68 y 1.05, la cual es 1.79 y 0.7 veces la ductilidad de diseño para el lado largo y lado corto respectivamente (figura 5.19).

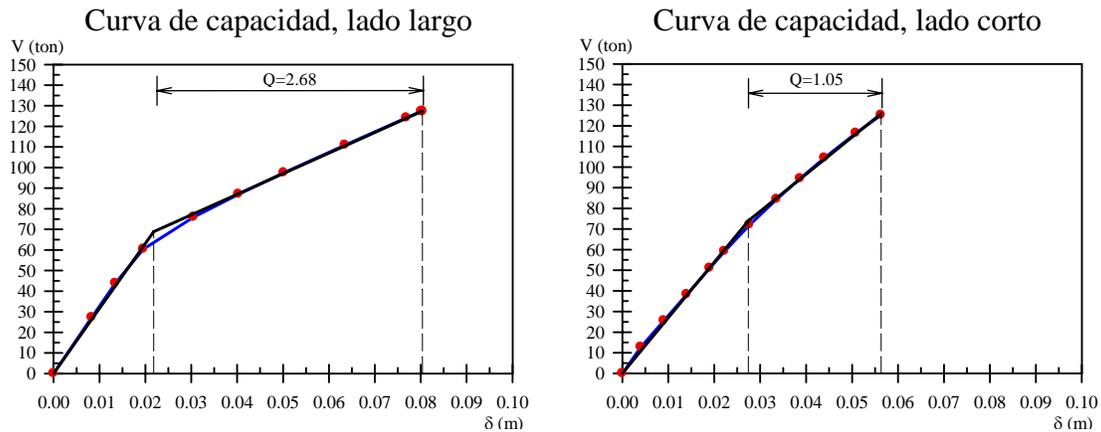


Figura 5.19. Ductilidad global estimada a partir de la curva de capacidad

Note que para este caso en particular la estructura falla por cortante, sin embargo no se debe dejar a un lado la posibilidad de que existan estructuras altas y esbeltas que puedan desarrollar la falla por flexión en la base de los muros de planta baja, sobre todo si estas se encuentran localizadas en algún tipo de terreno en que los efectos del sismo demanden mayores momentos de volteo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El diseño y construcción de estructuras nuevas de mampostería, en la ciudad de México, refleja que actualmente empiezan a ser cada vez más esbeltas y ubicadas en zonas de alto peligro sísmico. Esto implica que en ciertos casos el comportamiento a flexión comience a ser importante. Para estudiar si una estructura desarrolla un comportamiento adecuado ante excitaciones sísmicas que demanden a sus elementos sobrepasar sus propiedades elásticas es necesario contar con modelos de comportamiento esfuerzo-deformación que definan razonablemente esta condición.

En la presente tesis se desarrolló un trabajo experimental que permitió definir razonablemente modelos esfuerzo-deformación axial para tres tipos de mampostería fabricada en nuestro país, los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

1. La principal contribución de los modelos desarrollados es que proporcionan información requerida por modelos de análisis no-lineal de estructuras de mampostería con el objeto de caracterizar el comportamiento a flexión de sus muros, este estudio no busca el empleo de dichos modelos como herramientas de diseño.
2. En cuanto a los materiales utilizados para estas pruebas, se ha observado que de la década de los setentas a la fecha la calidad de las piezas empleadas para construir estructuras de mampostería ha descuidado su proceso de manufactura ocasionando que los índices de resistencia, peso volumétrico y absorción no cumplan con los parámetros que se especifican en las normas y reglamentos vigentes que regulan el diseño y construcción de elementos de mampostería en el Distrito Federal. Este problema se agudiza en piezas de producción artesanal o mecanizado sin ningún control de calidad, principalmente.
3. Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente indican que las mamposterías de piezas de ladrillo rojo recocido son las más flexibles y presentan un deterioro paulatino una vez que se ha sobrepasado la deformación asociada al esfuerzo máximo. Las curvas esfuerzo-deformación de las mamposterías hechas con piezas de tabique extruido vertical de dos huecos indican que este tipo de mampostería es la más resistente y presenta una falla frágil. Las curvas esfuerzo-deformación de las mamposterías de tabicón indican que son las más rígidas, las más débiles y que su deterioro es paulatino una vez que se alcanza el esfuerzo máximo.
4. El efecto del incremento en la velocidad de aplicación de carga axial afectó principalmente la resistencia de las mamposterías, incrementa muy poco la deformación asociada a dicha resistencia y disminuye el esfuerzo residual que las mamposterías pudiesen tener.

5. Se reconoce que la fuentes de los datos para obtener los modelos está muy limitada, en lo que respecta sobre una variabilidad para tomar en cuenta piezas de diferentes regiones y fabricantes, así como del tipo de mortero empleado.
6. Los diagramas momento curvatura obtenidos con los modelos presentados muestran que el empleo de modelos simplificados conduce a estimaciones conservadoras de la capacidad de deformación de muros que se comportan fundamentalmente a flexión.
7. El modo de falla observado para las piezas de tabique extruido vertical de dos huecos sugieren que muros esbeltos sometidos a momentos de volteo elevados pudieran tener comportamiento frágil si no se realiza un detallado adecuado de sus extremos.

APÉNDICE A

ESTADO DE LA MAMPOSTERÍA PARA DIFERENTES DEFORMACIONES

Ladrillo rojo recocido
(0.0016 mm/s)

ε	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.000				
0.003				
0.006				

ϵ	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.009				
0.012				
0.0155				
0.0195				

ESTADO DE LA MAMPOSTERÍA PARA DIFERENTES DEFORMACIONES

Tabique extruido vertical de dos huecos
(0.0016 mm/s)

ε	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.0000				
0.0015				
0.0030				

ε	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.0035				
0.0040				
0.0060				
0.0100				

ESTADO DE LA MAMPOSTERÍA PARA DIFERENTES DEFORMACIONES

Tabicón
(0.0016 mm/s)

ε	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.0000				
0.0010				
0.0020				

ε	Hacia PC	Hacia Marco	Deformímetro Izquierdo	Deformímetro Derecho
0.0070				
0.0120				
0.0175				
0.0210				

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Juárez, A (2009), “Mecanismos de resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada”, *Tesis de Maestría*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

Mayes, R L y R W Clough (1975), “A literature survey-compressive, tensile, bond and shear strength of masonry”, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 75-15, College of Engineering, University of California at Berkeley, California.

Meli, R y A Reyes (1971), “Propiedades mecánicas de la mampostería”, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, julio.

Meli, R y O Hernández (1971), “Propiedades de piezas para mampostería producidas en el Distrito Federal”, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, diciembre.

NMX-C-036-ONNCCE (2004), “Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – Resistencia a la compresión - Método de prueba”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 6 pp.

NMX-C-037-ONNCCE (2005), “Industria de la construcción - Bloques, ladrillo o tabiques y tabicones – Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 8 pp.

NMX-C-038-ONNCCE (2004), “Industria de la construcción - Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 5 pp.

NMX-C-404-ONNCCE (2005), “Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - Especificaciones y métodos de prueba”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 9 pp.

NTCM-2004 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.

ONNCCE (2006), “Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro y de concreto”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 9 pp. (en consulta pública)

Priestley, M J N y D McG Elder (1982), “Seismic Behaviour of slender concrete masonry shear walls”, Department of Civil Engineering, Research Report 82-4, University of Canterbury at Christchurch, New Zealand.

Rodríguez, M y J Botero (1995), “Comportamiento sísmico de estructuras considerando propiedades mecánicas de aceros de refuerzo mexicanos”, *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 49, Enero-Abril, pp. 39-50.

Salinas, V H (2009), “Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería combinada unidos con morteros utilizados en la autoconstrucción”, *Tesis de Maestría*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

Suzuki, S y A S Kiremidjian (1986), “The Mexico earthquake of September 1985, a preliminary report”, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 77, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University at Stanford, California.

Tena, A (1994), “Diseño de estructuras de mampostería”, *Apuntes del curso dictado de 1993 a la fecha* en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM y en la UAM Azcapotzalco, México.

Tena, A, A Juárez y V H Salinas (2007), “Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales”, *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 76, Enero-Junio, pp. 29-60.

Terán, A, D Arroyo y J Ruiz (2009), “Diseño por desempeño ¿El futuro para el diseño de las estructuras de mampostería?”, *Sexto Simposio Nacional sobre Ingeniería Estructural en la Vivienda*, Guanajuato, México.

Turkstra, C J (1970), “Resistencia de muros de mampostería ante cargas verticales excéntricas”, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, octubre.

User’s Guide to NZS 4230:2004 (2004), “Design of Reinforced Concrete Masonry Structures”, New Zealand Concrete Masonry Association Inc., September.

Valenzuela, E (2010), “Sobrerresistencia en estructuras de mampostería”, *Tesis de Maestría*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.